

INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG E.V.

3000 HANNOVER 1 • AN DER MARKUSKIRCHE 1 • TELEFON (0511) 601096-00



Theoretische Untersuchung über die Möglichkeiten der
Flachgründung nicht unterkellelter Einfamilienhäuser

- Voraussetzungen, Ausführbarkeit, Wirtschaftlichkeit -

Auftraggeber: Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Wilfried Zapke
Horst Friedrich

Hannover, im Juni 1984
NL 17

F 640

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Aufgabe	4
2 Begriffe und Grundlagen	6
2.1 Allgemeines	6
2.2 Einzelfundamente	9
2.3 Streifenfundamente	10
2.4 Gründungstreifen	10
2.5 Gründungsplatten	11
2.6 Gründung auf Schüttungen	13
2.7 Gründung auf Fertigteilen	14
3 Frost im Baugrund	14
3.1 Einflußgrößen	14
3.2 Frostkriterien	16
3.3 Frosteinwirkung	20
3.4 Frostschäden	25
3.5 Frosteindringtiefe	26
4 Das thermische Verhalten des Baugrundes	33
4.1 Wärmetransport	33
4.1.1 Wärmestrahlung	34
4.1.2 Wärmeleitung	34
4.1.3 Konvektion	34
4.2 Wärmekapazität	35

4.3	Wärmeleitfähigkeit	37
4.4	Temperaturleitfähigkeit	40
4.5	Zeitlich bedingte Schwankungen der Erdreich- temperatur	41
5	Thermische Verhältnisse unter flachgegründeten beheizten Gebäuden	43
5.1	Ergebnisse aus Messungen	43
6	Frostschutz im Straßenbau	51
6.1	Herkömmliche Frostschutzschichten	51
6.2	Substitution von Frostschutzschichten	52
6.3	Frostschutz durch Dämmschichten	54
6.3.1	Arten der Dämmstoffe	55
6.3.2	Anforderungen an Dämmstoffe	56
6.3.3	Bauarten	57
7	Der Einfluß der thermischen Verhältnisse im Baugrund auf die Gründungskonzeption	62
7.1	Ansatzpunkte für die Berücksichtigung der thermischen Baugrundverhältnisse	62
7.2	Die Möglichkeiten der Flachgründung bei Unter- schreitung der frostfreien Gründungstiefen gemäß DIN 1054	66
8	Zusammenfassung	76
	Literaturverzeichnis	

1 Aufgabe

Gemäß der Niedersächsischen Bauordnung müssen bauliche Anlagen so gegründet werden, daß ihre Standsicherheit durch die Beschaffenheit des Baugrundes und durch Grundwasser nicht beeinträchtigt wird.

Daraus folgt, daß die Gründungssohle aller Bauwerke frostfrei, mindestens aber 0,8 m unter Gelände liegen muß. Nur Bauwerke von untergeordneter Bedeutung, wie Einzelgaragen, einstöckige Schuppen und Bauwerke für vorübergehende Zwecke, sind von dieser Regelung ausgenommen.

Somit müssen auch nichtunterkellerte Einfamilienhäuser frostfrei gegründet werden. Sie erhalten vorwiegend Streifenfundamente.

Durch die verhältnismäßig hohen Anforderungen an die Gründung derartiger oft nur eingeschossiger Gebäude ergibt sich ein schlechtes Verhältnis zwischen den Kosten der Gründung und den Kosten des übrigen Bauwerkes.

Besonders unter dem augenblicklichen Kostendruck, aber auch langfristig, ist es deshalb sinnvoll zu untersuchen, ob die Gründung von Einfamilienhäusern nicht wirtschaftlicher gestaltet werden kann.

Damit rücken einfachere und dennoch sichere Möglichkeiten der frostfreien Gründung in den Mittelpunkt. Hinweise finden sich vornehmlich im Straßen- und Eisenbahnbau. Hier spielen Frosteinwirkungen schon seit vielen Jahren eine wesentliche Rolle bei der Planung und Ausführung, weil in diesen Bereichen die für Hochbauten üblichen Gründungen aus wirtschaftlichen Erwägungen ausscheiden.

In der Bundesrepublik Deutschland ist der Komplex des Zusammenwirkens von gefrorenem Baugrund mit dem Bauwerk im Wohnungsbau dadurch geregelt, daß man durch die Forderung nach frostfreier Gründungstiefe gemäß DIN 1054 /1/ eine Beeinträchtigung der Bau-

konstruktion durch Frost vermeidet. Im einzelnen wird unter Ziffer 4.1.1 vorgeschrieben:

" Die Gründungssohle muß frostfrei liegen, mindestens aber 0,8 m unter Gelände.

Hiervon darf abgewichen werden

- a) bei Bauwerken von untergeordneter Bedeutung (z.B. Einzelgaragen, einstöckige Schuppen, Bauwerke für vorübergehende Zwecke u.ä.) und geringer Flächenbelastung
- b) bei Gründungen auf nicht angewittertem Fels in gleichmäßig fest gelagertem Verband."

Die analoge Vorschrift der DDR TGL 11466 "Bauwerksgründungen; Mindestgründungstiefen" /23/ geht von einer Gründungstiefe der Fundamente bezogen auf die endgültige Oberkante des Geländes von 0,5 m aus. Nach Széchy /22/ legen die ungarischen Vorschriften fest, daß "die Gründungsebene bei bindigem oder halbbindigem Boden mindestens 80 cm, bei mehr als 300 m über Meeresspiegel mindestens 100 cm, in körnigem Boden 80 cm und unter 300 m Höhe über der Meereshöhe mindestens 50 cm tief unter dem Geländeniveau angenommen werden soll." Tomlinson, Driscoll und Burland berichten in /35/, daß in Großbritannien Fundamente unter den Außenwänden normaler Wohngebäude auch bei ungünstigen Bodenverhältnissen nicht tiefer als 45 cm gegründet zu werden brauchen.

Die Vergleichswerte anderer Länder zeigen, daß die Forderungen nach frostfreier Gründung gemäß DIN 1054 bezogen auf unsere klimatischen Verhältnisse relativ weit gehen, zumal durch die Beheizung nichtunterkellelter Wohngebäude eine Erwärmung des Untergrundes stattfindet, die die Frosteinwirkungen zumindest abschwächt. Es stellt sich die Frage, inwieweit unterhalb der Sohlplatte überhaupt mit Frost zu rechnen ist und welche konstruktiven Schlußfolgerungen gegebenenfalls gezogen werden können.

Aus diesem Grunde hat der Niedersächsische Sozialminister das Institut für Bauforschung beauftragt, die Möglichkeiten einer Flachgründung bei nichtunterkellerten Einfamilienhäusern theoretisch zu untersuchen.

2 Begriffe und Grundlagen

2.1 Allgemeines

Baugrund, Gründung und Gebäude bilden aus statischer Sicht ein geschlossenes System. Die auf das Gebäude einwirkenden Lasten werden über seine Tragkonstruktion in die Gründung geleitet, dort verteilt und an den tragfähigen Baugrund abgegeben. Im Boden geweckte Reaktionskräfte halten diesen Lasten im Sinne des Dritten Newtonschen Axioms "actio et reactio" (Abb. 1) das Gleichgewicht.

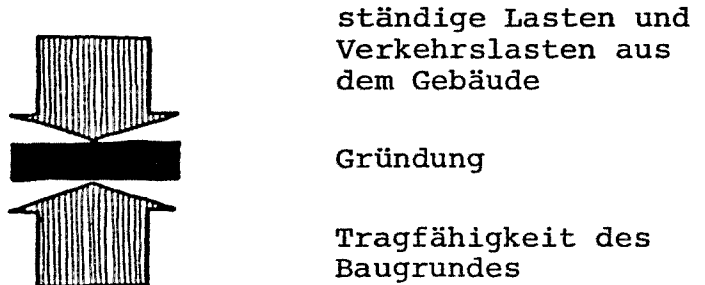


Abb. 1: Actio et reactio

Infolge seines Eigengewichtes und der sonstigen Lasten verursacht das Gebäude Verformungen des Baugrundes, die sich als Setzungserscheinungen bemerkbar machen. Im Fall besonders hoher Lasten und/oder sehr geringer Tragfähigkeit des Bodens können diese Verformungen so groß werden, daß ein Bruch des Baugrundes eintritt. Man spricht vom sogen. Grundbruch. Die Standsicherheit des Gebäudes verlangt daher nicht nur eine ausreichende Sicherheit gegen Grundbruch, sondern zur Vermeidung von Bauschäden bereits eine Begrenzung der Setzungen bzw. Setzungsunterschiede.

Welche Gründungsart am zweckmäßigsten ist, hängt von der Steifigkeit des Gebäudes, der Tragfähigkeit des Untergrundes, seiner Schichtenfolge und nicht zuletzt von den Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Realisierung ab. Je nachdem, ob die Gebäudelasten in Abhängigkeit von der Gründungsart in obere oder aber in tieferliegende Bodenschichten übertragen werden, spricht man von

- Flachgründungen bzw.
- Tiefgründungen.

Flachgründung heißt jene Gründungsart, bei der die Gebäudelasten ohne nachteilige Setzungserscheinungen durch Flächengründung unmittelbar den oberflächennahen Bodenschichten übergeben werden. Sobald es die Baugrundverhältnisse erlauben, wird diese Art der Gründung nicht nur im Hochbau, sondern auch bei Industrie- und Brückenbauten sowie in den verschiedensten Bereichen des Tiefbaus aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus eingesetzt.

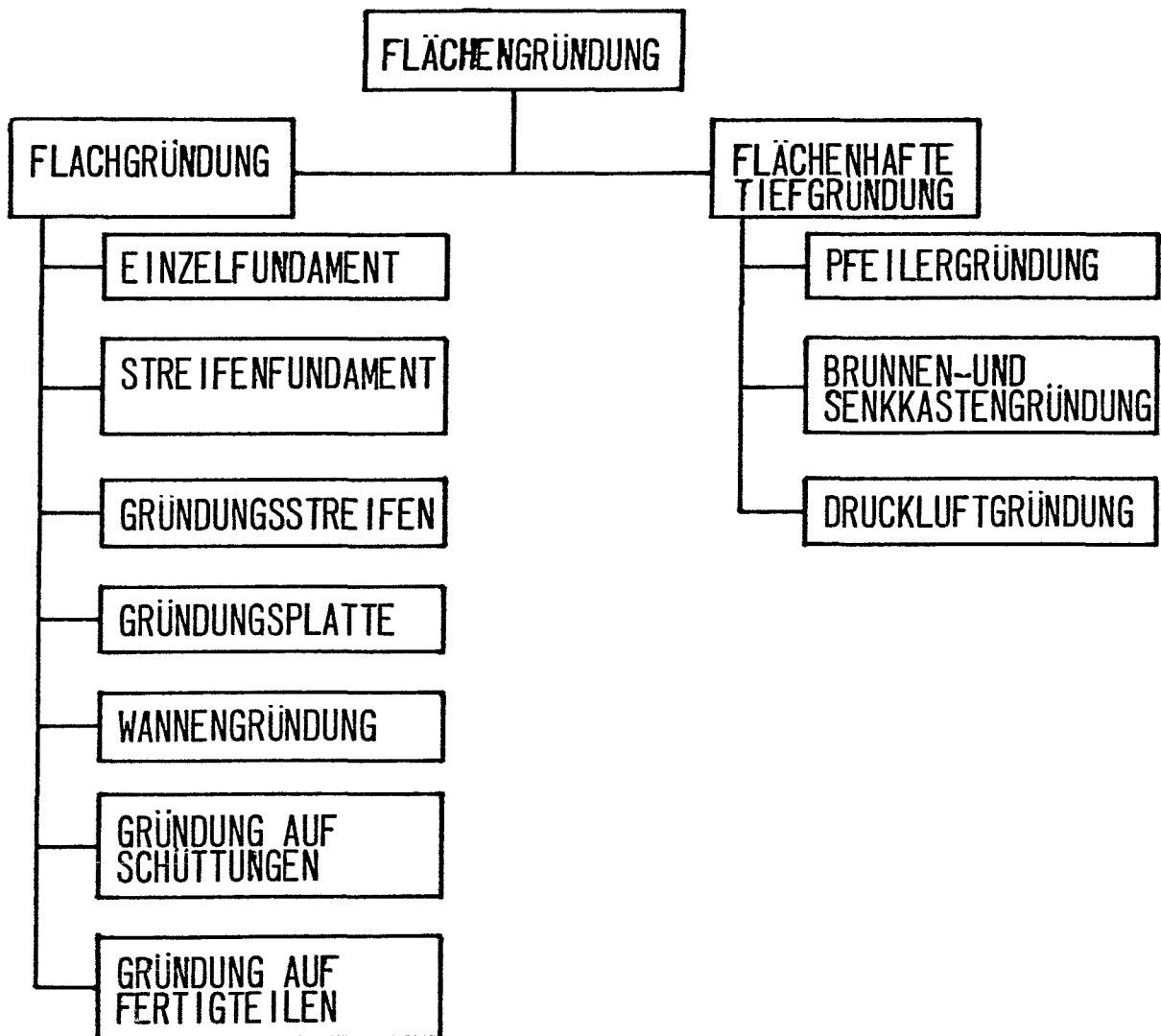


Abb. 2: Gründungsarten

Mit Rücksicht auf die Verschiedenartigkeit von Flachgründungen werden die in Abb. 2 genannten Formen kurz erläutert.

2.2 Einzelfundamente

Einzelfundamente (Abb. 3) werden unter lastkonzentrierenden Bauteilen wie Pfeilern und Stützen angeordnet. Sie weisen im allgemeinen einen quadratischen, manchmal einen rechteckigen und seltener einen kreisförmigen Grundriß auf. Als Baustoff wird Beton verwendet, der zum Zwecke einer ausreichenden Druckausbreitung je nach dem Verhältnis der Fundamenthöhe zu seiner Auskragung bewehrt wird. Höhere Einzelfundamente werden abgetreppt oder abgeschrägt, was einerseits zu einer Materialersparnis führt, andererseits aber einen höheren Schalungsaufwand bedingt.

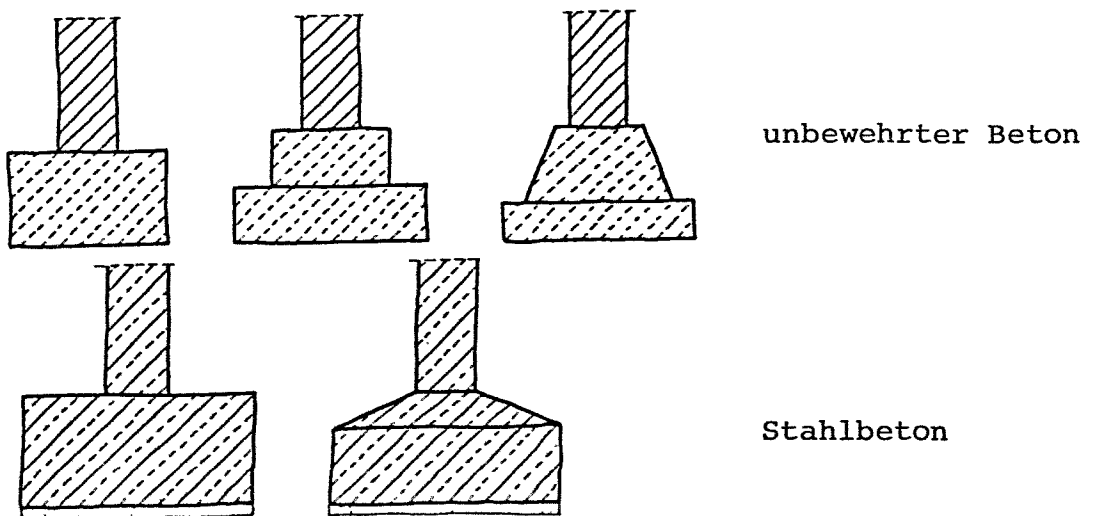


Abb. 3: Einzelfundamente

2.3 Streifenfundamente

Streifenfundamente ordnet man unter tragenden Wänden an; ihre Querschnitte entsprechen im Prinzip denen der Einzelfundamente. Im allgemeinen werden Streifenfundamente aus Beton hergestellt, wobei man bei größeren Fundamentbreiten die Konstruktionshöhe reduziert und stattdessen eine Bewehrung zur Aufnahme der Zugkräfte quer zur Längsrichtung einlegt (Abb. 4).

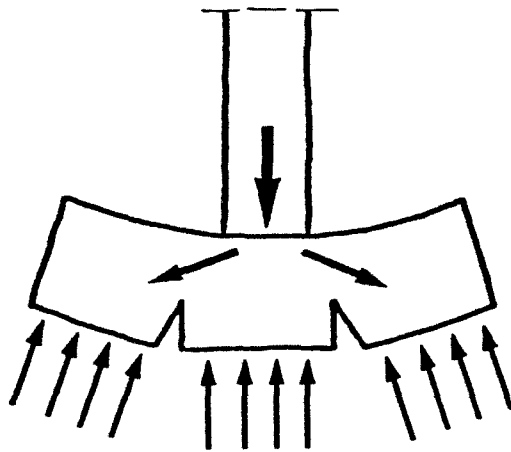


Abb. 4: Schematische Darstellung der Kräftewirkung

2.4 Gründungsstreifen

Bei Streifenfundamenten setzt man voraus, daß die Bauwerkslasten durch nichtunterbrochene Wände (Wandscheiben) auf das Fundament übertragen werden, damit sich tatsächlich gleichmäßig verteilte Sohlspannungen in Längsrichtung einstellen können (Abb. 5)

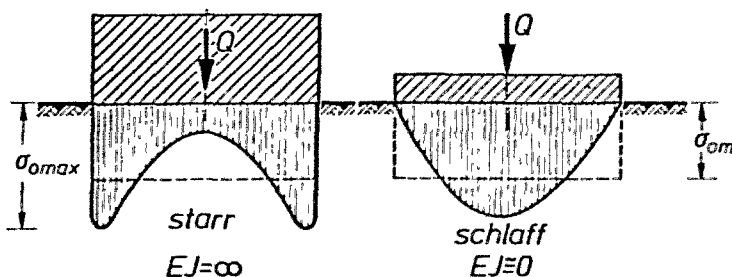


Abb. 5: Sohlspannungsverteilungen

Wird ein Streifenfundament jedoch durch Einzellasten, z.B. aus einer Stützenreihe, belastet, würden in der Sohlfuge mehr oder weniger unbelastete Bereiche mit stark beanspruchten Bereichen unterhalb der Lasteintragungspunkte abwechseln. Damit die Bauwerkslasten auch hier annähernd gleichmäßig in den Untergrund geleitet werden, muß das Fundament in seiner Längsrichtung ausreichend biegesteif sein. Dies wird durch Einlegen einer Längsbewehrung erreicht, die über die Sohldruckspannungen gemäß DIN 4018 ermittelt werden kann /3/.

Gründungsstreifen (Abb. 6) liegen damit in ihrer Wirkung zwischen Einzel- und Streifenfundamenten.

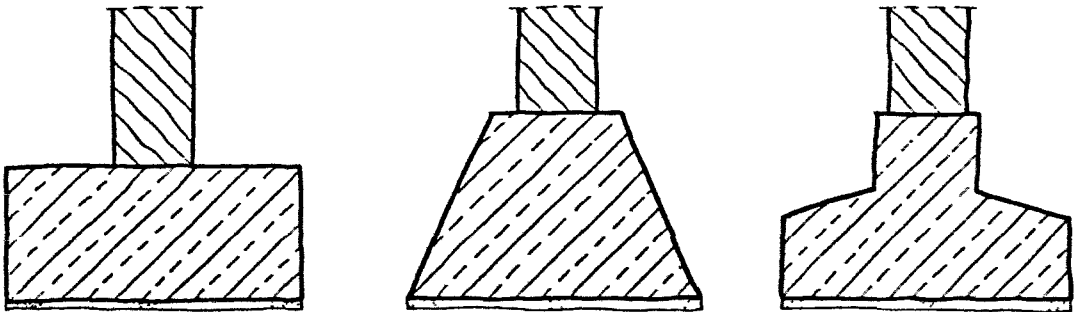


Abb. 6: Querschnitte von Gründungsstreifen

2.5 Gründungsplatten

Vornehmlich bei geringer Tragfähigkeit des Baugrundes kann die Gründungsfläche durch den Einsatz biegesteifer Gründungsplatten wesentlich vergrößert werden. Damit werden örtliche Spannungsspitzen in der Sohlfuge und größere Setzungsunterschiede vermieden.

Früher erfolgte die Lastverteilung in solchen Fällen über sogen. Sohlgewölbe, wie man sie noch unter alten Gebäuden finden kann (Abb. 7).

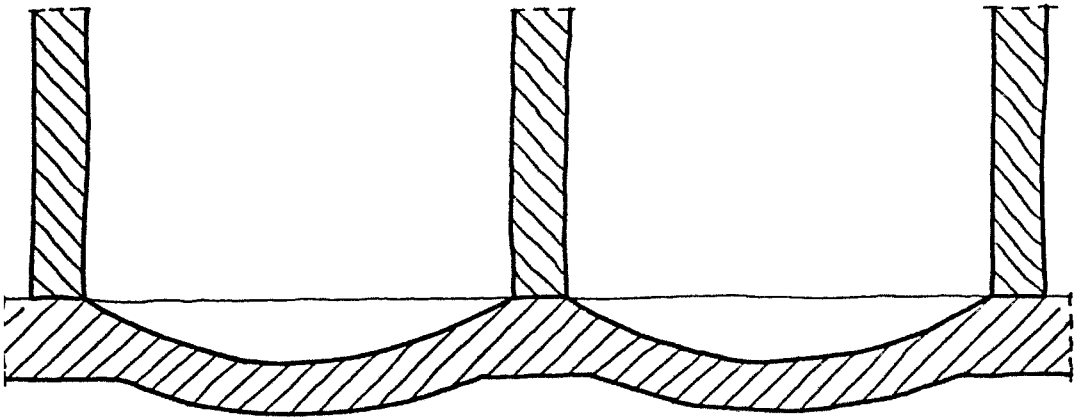


Abb. 7: Sohlgewölbe

Diese Gewölbe sind nach unten gewölbt und stützen sich gegen die Kellerwände ab. Heute werden stattdessen Stahlbetonplatten eingesetzt, die im allgemeinen auf der Ober- und Unterseite bewehrt sind, um sowohl positive als auch negative Biegemomente aufnehmen zu können. Da die lohnintensiven Schalungsarbeiten praktisch ganz entfallen und außerdem der sowieso notwendige Abschluß gegen das Erdreich in Form einer konstruktiv bewehrten Sohlplatte entfällt, werden Gründungsplatten auch in zunehmendem Maße als Gründung auf gut tragfähigem Baugrund verwendet.

Nach der Querschnittsausbildung der Platten unterscheidet man zwischen Platten konstanter Dicke und solchen mit örtlichen Verstärkungen durch Lastverteilbalken (Abb. 8).

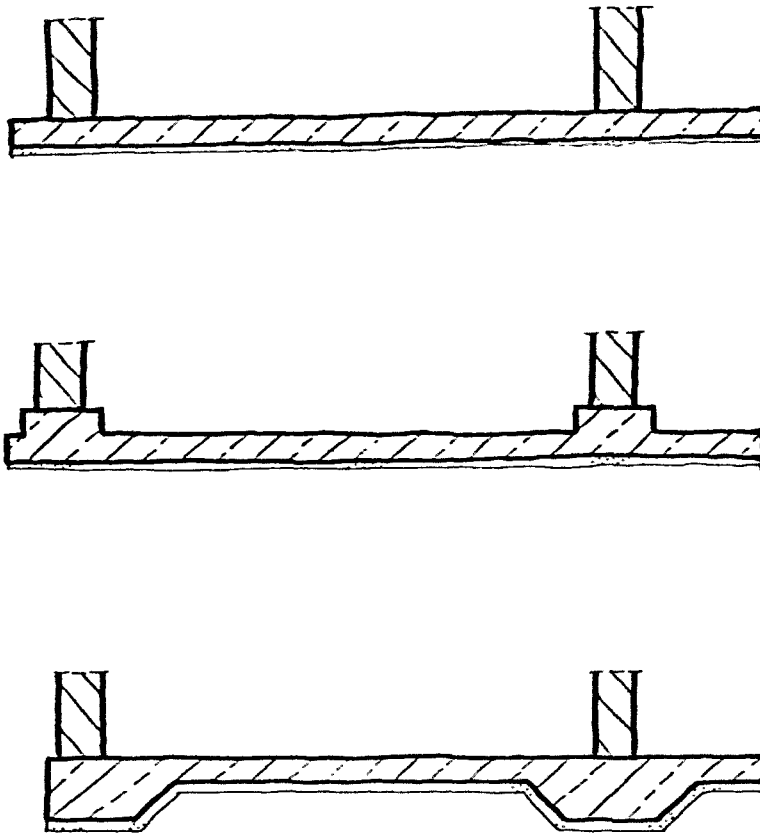


Abb. 8: Querschnitte von Gründungsplatten

Unentbehrlich ist die Gründungsplatte als wasserdichtes und dem Auftrieb entgegenwirkendes Bauteil im Grundwasserbereich, wobei in Verbindung mit wasserdichten Außenwänden die sogen. Wannengründung entsteht.

2.6 Gründung auf Schüttungen

Wenn die unmittelbar unter der Gründungssohle anstehenden Bodenschichten nicht die an sie gestellten Anforderungen erfüllen, können diese gegen einen geeigneten anderen Boden ausgetauscht werden. Dazu wird begrenzt bzw. nicht tragfähiger Boden ausgehoben und durch einen gut zu verdichtenden tragfähigen Boden ersetzt. Der Einbau erfolgt oberhalb des Grundwasserspiegels lagenweise, wobei die Lagedicke zum einen von dem Maß der Verdichtung und zum

anderen von dem zur Verfügung stehenden Verdichtungsgerät abhängt. Auch bei Einzel- und Streifenfundamenten ist es im allgemeinen günstiger, nicht nur die durch die einzelnen Fundamente begrenzten Zonen, sondern die gesamte Fläche unterhalb des Gebäudes zu verbessern. Aushub und auch Verdichtung des Ersatzbodens lassen sich dann leichter durchführen.

2.7 Gründung auf Fertigteilen

Für Streifenfundamente sind verschiedentlich aus Rationalisierungsgründen Fertigteile vorgeschlagen worden. Dieses Verfahren stellt eine Weiterentwicklung der früher üblichen Fundamentierung mit Hilfe von Natursteinen bzw. frostbeständigen Mauerziegeln dar.

Fundamentsteine können in entsprechend niedriger Bauhöhe hergestellt werden, so daß das aufwendige Ausheben der Fundamentgräben entfallen kann. Es empfiehlt sich, unter den Steinen eine gut verdichtete Kies-Sand-Schicht einzubauen, die gleichzeitig zur Ableitung von Grund- und Sickerwasser genutzt werden kann.

3 Frost im Baugrund

3.1 Einflußgrößen

Gefrorener Boden bildet sich, wenn aufgrund niedriger Außenlufttemperaturen eine Abkühlung des Bodens unter 0°C erfolgt und das im Boden enthaltene Wasser gefriert. Die Höhe der Außenlufttemperaturen, die Dauer der Frostperiode und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, die ihrerseits vom Aufbau des Baugrundes und seinem Feuchtigkeitsgehalt abhängt, sind hierbei die primären Einflußfaktoren (Abb. 9). Sekundär treten Faktoren wie das Vorhandensein einer Schneedecke, Art und Dichte der Vegetation bzw. der Bebauung sowie die Geländeform und -beschaffenheit in Erscheinung. Sie stehen in steter Wechselbeziehung zu den primären Einflußgrößen, variieren auf engstem Raum und

sind für die Beurteilung möglicher Frosteinwirkungen von wesentlicher Bedeutung.

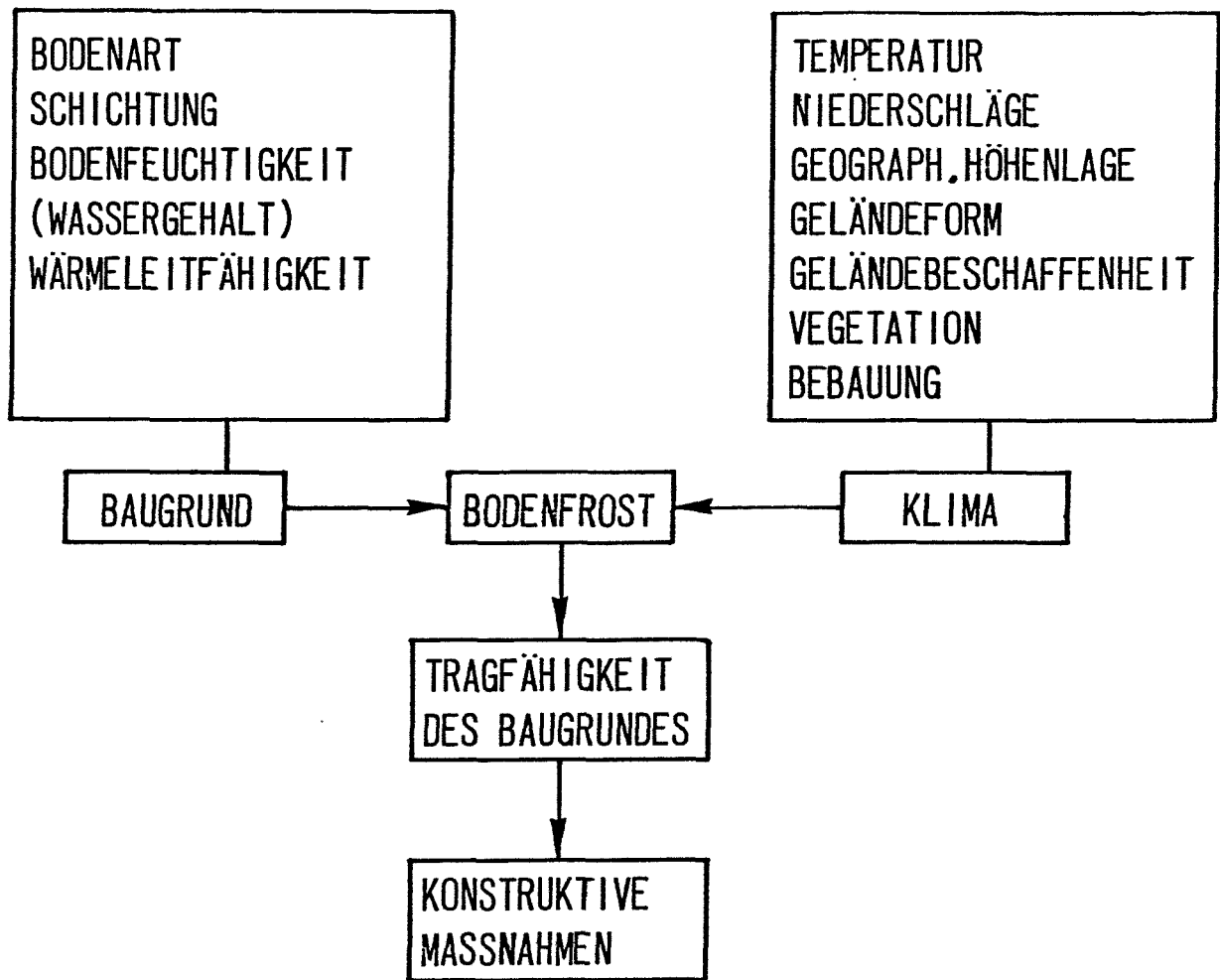


Abb. 9: Einflußfaktoren für die Entstehung von Bodenfrosth und ihre Auswirkungen

Beispielsweise verändern Städte und Industrieansiedlungen das Mikroklima in merklicher Weise. So liegt die Lufttemperatur in Großstädten im Jahresmittel etwa 1°C über der in unbebauter Umgebung. Zu erklären ist diese Erscheinung mit der Verringerung der Strahlungsintensität durch Luftverunreinigungen, der Speicherfähigkeit der Gebäude und anderer Bauwerke sowie die während der kalten Jahreszeit durch Beheizung frei werdenden Wärmemengen. Außerdem können die Niederschläge in Städten nicht im gleichen Maße im Boden versickern wie im unbebauten Gelände. Der größte Teil fließt sofort an der Oberfläche ab und wird direkt der Kanalisation zugeführt. Als Folge dieser veränderten Verhältnisse wird der Frost in Städten weniger tief in den Boden eindringen als im Umland.

Doch nicht nur die zivilisatorischen Eingriffe in die Natur, sondern auch die natürlichen Gegebenheiten haben ihren Einfluß. So wird sich z.B. ein Nordhang hinsichtlich der Entstehung von Bodenfrost und der Eindringtiefe bei sonst gleichen Randbedingungen anders verhalten als ein Südhang. Schnee wirkt als Wärmedämmung, die so stark sein kann, daß der Frost nur wenige Zentimeter in den Boden eindringen kann.

3.2 Frostkriterien

Die Bedingungen, unter denen ein Boden als frostgefährdet gelten kann, sind in der Vergangenheit uneinheitlich definiert. Daher sind auch die in diesem Zusammenhang verwendeten Begriffe nicht einheitlich geregelt.

Casagrande /58/ nennt Böden mit den nachstehend aufgeführten Eigenschaften frostgefährlich

- ungleichkörnige Böden mit einem Ungleichkörnigkeitsgrad größer als 15 und mit mehr als 3% Kornanteil 0,02 mm Korndurchmesser

- gleichkörnige Böden mit einem Ungleichkörnigkeitsgrad kleiner als 5 und mit mehr als 10% Kornanteil 0,02 mm Korndurchmesser.

Schaible /50/ unterscheidet (Abb. 10) zwischen frostgefährlichen und frostempfindlichen Böden. Ein Boden gilt als frostgefährlich bzw. frostempfindlich, wenn seine Körnungskurve den in der untenstehenden Abbildung als "frostgefährdet" bzw. "frostempfindlich" bezeichneten Bereich schneidet. Liegt seine Körnungskurve außerhalb, so sind keine Frosthebungen zu erwarten.

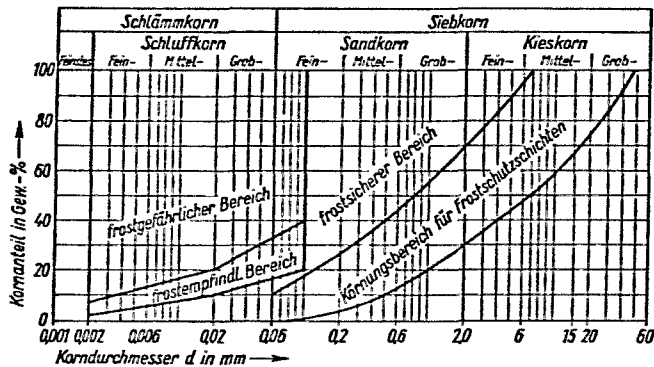


Abb. 10: Frostkriterien nach Schaible /50/

In /9/ wird auf die Möglichkeit einer näherungsweisen Beurteilung der Frostempfindlichkeit (Neigung zur Eislinnenbildung) nach der Korngrößenverteilung und der mineralogischen Zusammensetzung hingewiesen, indem eine Einteilung der Bodenarten in drei Frostempfindlichkeitsklassen F 1, F 2, F 3 vorgenommen wird. Danach sind die in Abbildung 11 gekennzeichneten Böden als nicht frostempfindlich anzusehen.

Kurzbezeichnung	Frostepfindlichkeit	Bodenart (DIN 18196)
F 1	nicht frostepfindlich	GW, GI, GE SW, SI, SE
F 2	gering bis mittel frostepfindlich	TA OT, OH, OK TM ST, GT } 1) SU, GU
F 3	sehr frostepfindlich	TL UL, UM OU ST̄, GT̄ SÜ, GÜ

1) Nur wenn ≥ 5 Gew.-% $< 0,063$ bei $U \geq 15$ oder ≥ 15 Gew.-% $< 0,063$ bei $U \leq 6$. Für $6 < U < 15$ kann linear interpoliert werden.

Abb. 11: Klassifikation der Frostepfindlichkeit von Bodenarten /9/

Abb. 12: Gruppeneinteilung der Böden für bautechnische Zwecke (Klassifikation der Lockergesteine) nach DIN 18196

1	2	3	4	5	6	7
Definition und Bezeichnung						
Hauptgruppen	Komponenten- anteile in Gew.-%	Gruppen	Kurzzeichen Gruppensymbol	Erkennungsmerkmale	Beispiele	
Grobkörnige Böden	V5 V40	Kies	GE	stiele Körnungslinie infolge Vorherrschens eines Korngrößensbereichs	Fluß- und Strandräcke Terrassen-schotter Moränenles vulkanisches Schotter und Asche	
			GW	über mehrere Korngrößensbereiche verlaufende Körnungslinie		
			GI	treppenförmig verlaufende Körnungslinie infolge Fehlens eines oder mehrerer Korngrößensbereiche		
			SE	stiele Körnungslinie infolge Vorherrschens eines Korngrößensbereichs	Dünen- und Flugsand Tolkand (Berliner Sand) Beckensand Terrassensand	
			SW	über mehrere Korngrößensbereiche kontinuierlich verlaufende Körnungslinie	Moränensand Terrassensand Strand sand	
		Sand	SI	treppenförmig verlaufende Körnungslinie infolge Fehlens eines oder mehrerer Korngrößensbereiche		
			GU	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Verwitterungs-kies
			GU	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	lehmiger Kies
			GT	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	lehmiger Kies
			GT	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
Gemischtkörnige Böden	V5 bis 40 V40	Kies-Schluff-Gemische	GU	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Flot sand
			GU	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Auelehm Sandfloss
			SU	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	lehmiger Sand
			SU	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
			ST	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
		Sand-Ton-Gemische	ST	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
			ST	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
			ST	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
			ST	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm
			ST	15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	weit oder intermittierend gestufte Körnungslinie	Geschiebelehm

1	2	3	4	5	6	7															
Definition und Bezeichnung																					
Hauptgruppen	Feinkornanteile in Gew.-% ≥ 0,06 mm	Loge zur A-Linie (siehe Bild 4)	Gruppen	u _f in Gew.-%	Kurzzeichen Gruppensymbol	Erkennungsmerkmale															
Feinkörnige Böden	> 40	u _f ≤ 4 Gew.-% oder unterhalb der A-Linie	Schluff	UL	niedrige	Reaktion beim Schüttelversuch															
				UM	niedrige	Reaktion beim Schüttelversuch															
				TI	mittlere	Reaktion beim Schüttelversuch															
				TM	hohe	Reaktion beim Schüttelversuch															
				TA	sehr hohe	Reaktion beim Schüttelversuch															
		Ton	u _f ≥ 7 Gew.-% und oberhalb der A-Linie	Ton	OU	mittlere	Reaktion beim Schüttelversuch														
					OT	hohe	Reaktion beim Schüttelversuch														
					OH	Beimengungen pflanzlicher Art, meist dunkle Färbung, Modergeruch, Glühverlust bis etwa 20 Gew.-%	Reaktion beim Schüttelversuch														
					OK	Beimengungen nicht pflanzlicher Art, meist helle Färbung, leichtes Gewicht, große Porosität	Reaktion beim Schüttelversuch														
					HN	an Ort und Stelle aufgewachsene (sedenäre) Humus-bildungen	Reaktion beim Schüttelversuch														
organogene ¹⁾ und Böden mit organischen Beimengungen	> 40	nicht brenn- oder nicht schwelbar	nicht brenn- oder nicht schwelbar	nicht brenn- oder nicht schwelbar	nicht brenn- oder nicht schwelbar	nicht brenn- oder nicht schwelbar															
							brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar										
												brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar					
																	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar
		brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar															
							brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar										
												brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar					
																	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar
brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar																	
					brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar												
										brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar							
															brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar		
																				brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar
brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar																	
					brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar												
										brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar							
															brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar		
																				brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar
brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar																	
					brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar												
										brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar							
															brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar		
																				brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar
brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar																	
					brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar												
										brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar							
															brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar		
																				brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar
brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar																	
					brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar												
										brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar	brenn- oder schwelbar							
															brenn- oder schwelbar	b					

3.3 Frosteinwirkung

Eine starke Durchfeuchtung des Baugrundes und eine gleichmäßige Wasserzufuhr werden bei entsprechenden Außenlufttemperaturen stets zu Eisbildung im Boden führen. Wie sich allerdings ein Boden verhält, hängt von mehreren bodenspezifischen Parametern ab, und zwar:

- der Korngrößenverteilung
- der daraus resultierenden Porengrößenverteilung
- der Füllung dieser Poren
- der Wasserdurchlässigkeit
- den Feinkornanteilen.

Innerhalb der Bodenklassifizierung nach DIN 18196 (vgl. Abb. 12) kann man hinsichtlich des Verhaltens unter Frosteinwirkung in vereinfachender Form zwischen bindigen und nichtbindigen Böden unterscheiden.

In bindigen Böden bilden sich durch Wasseranlagerung im Korngerüst Eislinsen, deren lange Achsen im allgemeinen parallel zu den Isothermen und damit parallel zur Geländeoberfläche verlaufen (Abb. 13). Dabei hängt die Dicke der Linsen im wesentlichen vom Wassernachschub im Boden ab. Sie schwankt zwischen einigen Millimetern und mehreren Zentimetern. An der Geländeoberfläche machen sich diese Frostwirkungen als meßbare Verformungen, sogen. Frosthebungen, bemerkbar. Ihre Größe ist rechnerisch die Summe der Dicken der Eislinsen.

Es zeigt sich aber, daß die durch Frosthebungen verursachten Volumenvergrößerungen größer sind als diejenigen, die sich durch die Volumenausdehnung des in der Gefrierzone befindlichen Wassers - sie beträgt 9% - einstellen. Folglich muß an der Eislinsenbildung noch zusätzlich im Boden vorhandenes Wasser beteiligt sein.

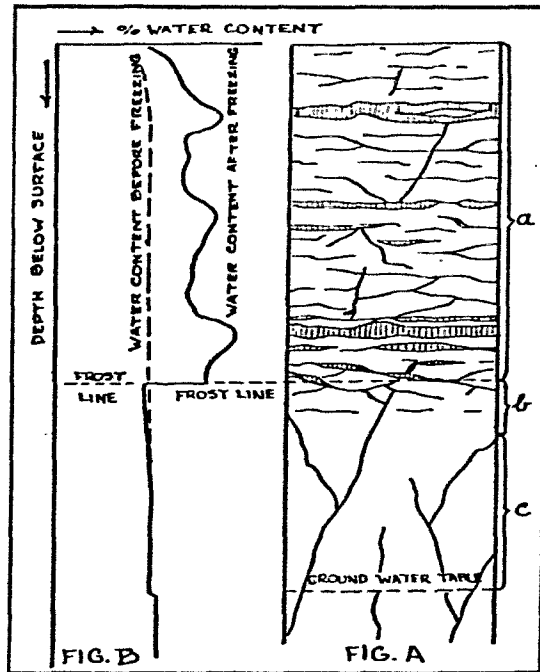
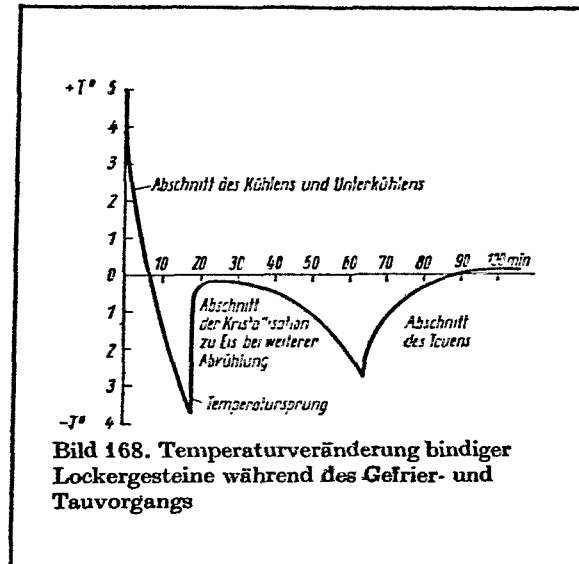


Abb. 13: Schematische Darstellung der Eislinnenbildung und Wasseranreicherung in einem starkbindigen Lockergestein während der Frostperiode nach Beskow /54/

Als grundlegende Voraussetzung für die Eislinnenbildung wird nach /21/ die Tatsache angesehen, daß das Wasser im Boden erst nach Unterkühlung gefriert, so daß die für eine Wasserbewegung und Frosthhebung notwendige Energie erzeugt wird. Es wird dort ausgeführt:

"Beim Eindringen des Frostes in den Baugrund erfolgt zuerst eine Unterkühlung des vorhandenen Wassers unter 0°C , bis die Kristallisation zu Eis einsetzt. Dabei tritt ein sprunghafter Temperaturanstieg bis zu der für das jeweils anstehende Lockergestein konstanten Temperatur des Gefrierbeginns in Erscheinung. Sie liegt bei nichtbindigen Lockergesteinen*) nahe 0°C , während sie bei bindigen Lockergesteinen einige Zehntel Grad unter 0°C erreicht. Ursache für den Temperatursprung ist die während der Eisbildung frei werdende Wärme. Der Kristallisationsprozeß schreitet dann bei allmählich absinkender Temperatur weiter voran (Bild 168)".

*) Lockergestein = Boden



Dabei übt die Kristallisationskraft des Eises auf das im Umfeld des wachsenden Eiskristalles befindliche Wasser einen Unterdruck aus, der zu einer Wasserwanderung entlang der an den Bodenteilchen haftenden Wasserschichten hin zum Eiskristall führt und den Kristallisationsvorgang fördert.

Da mit der Zunahme des Feinkornanteils die Wasserdurchlässigkeit abnimmt, also das Wasserangebot im Boden sinkt, bilden sich in diesen Fällen im Verhältnis gesehen kleinere Eislinen. Daraus folgt, daß durch Frosthebungen generell solche Böden gefährdet sind, die sowohl eine mäßige Saugkraft bei der Kristallisation des Eises als auch eine mäßige Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Hier sind vor allem Schluffe sowie schluff- und tonhaltige Sande bzw. Kiese zu nennen.

Während der Tauperiode verläuft der zuvor geschilderte Prozeß in mehr oder weniger umgekehrter Form. Durch das frei werdende Tauwasser, das infolge der mäßigen Wasserdurchlässigkeit des Bodens oder noch in größerer Tiefe vorhandener Eislinen nicht versickern kann, wird eine Konsistenzänderung des bindigen Bodens bis hin zum breiigen

Zustand hervorgerufen und die Tragfähigkeit rapide vermindert.

In nichtbindigen Böden läuft der Gefriervorgang im allgemeinen ohne zusätzlichen Wassertransport in die Gefrierzone ab, so daß Eislinsen wie beim bindigen Boden nicht gebildet werden können. Die in der Regel nicht vollständig mit Wasser gefüllten Poren, die außerdem untereinander in Verbindung stehen, bieten ausreichend Raum für das im Verhältnis zu Wasser um 9% vergrößerte Eisvolumen. Der Hebungseffekt bleibt somit aus. Stattdessen werden die einzelnen Körner von einer Eiskruste umgeben, was schließlich dazu führt, daß die einzelnen Körner fest miteinander verkittet werden. Es bildet sich der sogen. Eiszement (Abb. 14).

Auch bei Wassersättigung und bei freier Verbindung der Gefrierzone mit dem Grundwasser sind keine Hebungseffekte zu erwarten, weil das Überschußwasser ausgepreßt wird. Zu beachten sind aber nichtbindige Böden mit geringen Prozentanteilen an Körnungen mit einem Korndurchmesser, der unter 0,1 mm liegt. Solche Böden weisen bereits schwache Saugkräfte auf, die jedoch nur bei fehlenden Auflasten zur Bildung von Eislinsen führen können.

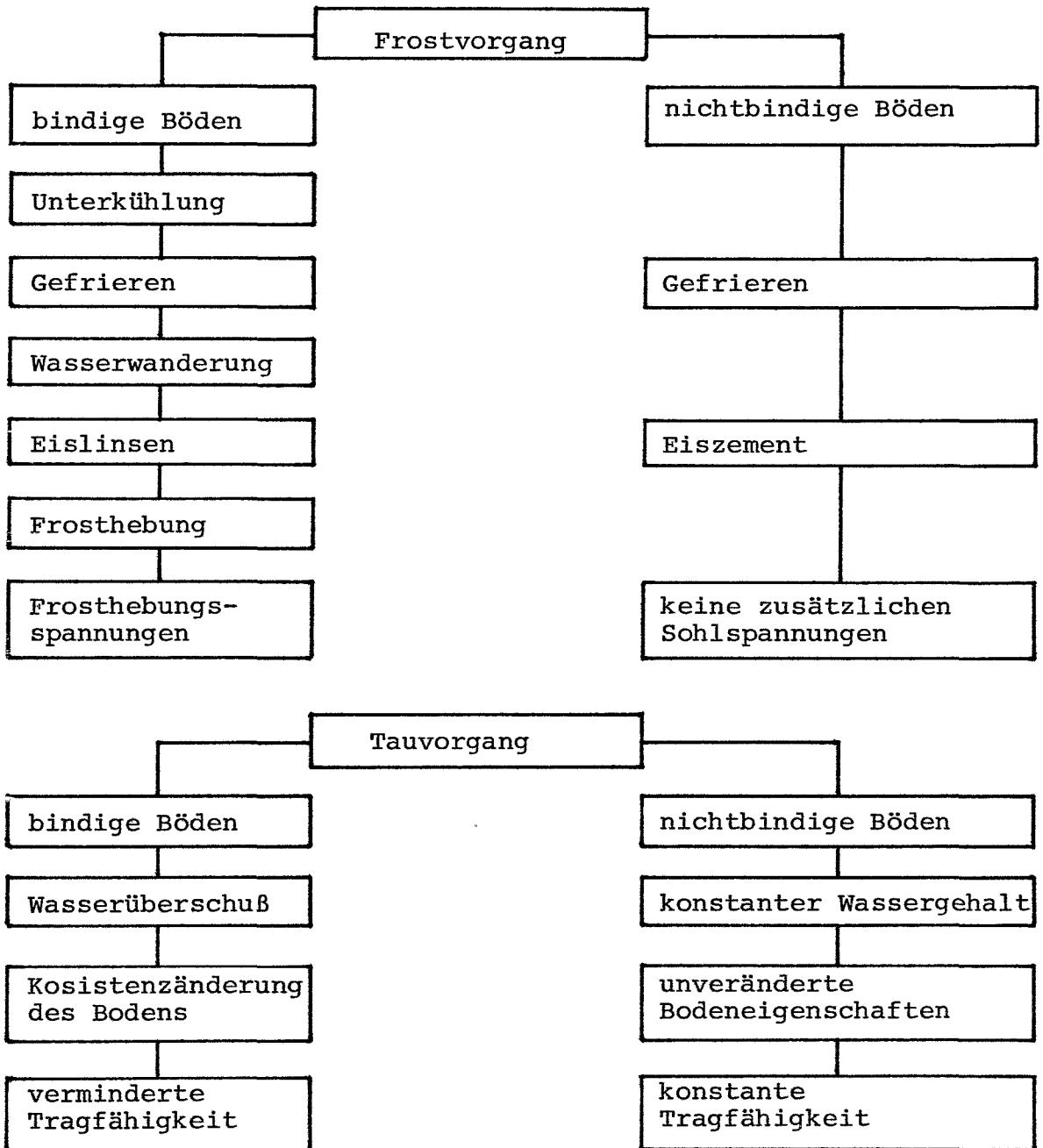


Abb. 14: Frost- und Tauvorgänge im Boden

3.4 Frostschäden

Schäden an Bauteilen, die im Bereich dauernder Durchfeuchtung liegen, werden häufig durch normale Eisbildung in den Poren und Hohlräumen und die damit verbundene Sprengwirkung ausgelöst. Sie sind in diesem Zusammenhang nicht relevant.

Frostschäden durch Bodenfrost sind immer dann zu erwarten, wenn

- durch Frosteinwirkung Volumenveränderungen des Baugrundes, also Frosthebungen stattfinden oder
- während des Tauprozesses durch Abnahme der Tragfähigkeit Setzungen bis hin zum Grundbruch als Folge der Erhöhung des Wassergehaltes im Boden auftreten.

Dabei wird je nachdem, wie der Frost auf den Baukörper einwirken kann, die Eislinnenbildung unterschiedliche Bewegungen hervorrufen. Dringt der Frost auf beiden Seiten eines Fundamentes gleichmäßig in den Boden ein, so werden sich vertikal gerichtete Hebungen einstellen (Abb. 15a). Bei einseitiger Frosteinwirkung dagegen wird das Fundament verdreht (Abb. 15b). Einen Sonderfall bildet die in Abb. 15c dargestellte Situation, bei der eine Stützwand infolge Eislinnenbildung seitlich verschoben wird.

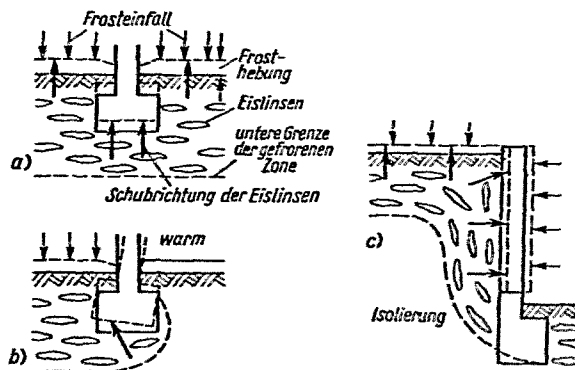


Abb. 15: Frosteinwirkung auf Fundamente und Wände /19/
a) Hebung eines Fundaments
b) Drehung eines Fundaments
c) seitliche Verschiebung einer Wand

3.5 Frosteindringtiefe

Für die Lösung der konstruktiven Probleme und zur Vermeidung von Frostschäden ist die Kenntnis der größten Eindringtiefe des Bodenfrostes von Bedeutung. Gemessen wurden in Mitteleuropa je nach der herrschenden Winterwitterung Frosteindringtiefen zwischen 0,40 m und 1,50 m. Schaible/50/ und Ruckli /51/ berichten über Frostversuche an der Reichsautobahn in den dreißiger Jahren, bei denen Frosttiefen von 50 bis 90 cm gemessen wurden. Besonders anschaulich sind Ergebnisse aus Feldversuchen, die von Ruckli /51/ in den Wintern 1938/40 in der Nähe von Luzern durchgeführt wurden. Die Versuche hatten den Zweck, den Frosthebungsvorgang auf einer Straße in allen seinen Phasen zu verfolgen und die Beziehungen zwischen dem Verlauf der Lufttemperatur, der Bodentemperatur, der Frosteindringtiefe, des Grundwasserstandes und der Frosthebung empirisch festzustellen. Die in Abb. 16 aufgetragenen Ergebnisse beziehen sich auf den Zeitraum Dezember 1939 bis März 1940.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden im Zeitraum von 1957 bis 1971 von 11 Wetterstationen die winterlichen Bodentemperaturen zur Bestimmung der Frosteindringtiefe ermittelt /59/. Dies erfolgte durch Temperaturmessungen in verschiedenen Tiefen (22, 30, 40, 50, 70, 100, 170 cm) unter einer 20 cm dicken Betonplatte, die immer schneefrei gehalten wurde. Die so ermittelten Frosttiefen sind, weil die wärmedämmende Wirkung von auf der Bodenoberfläche liegenden Schneeschichten nicht in die Messungen eingeflossen ist, extrem ungünstig. Die geringsten Tiefen lagen zwischen 30 und 47 cm, während die maximalen Werte 85 bis 145 cm betrugen. Das Mittel der Frosteindringtiefen bewegte sich zwischen 50 und 75 cm.

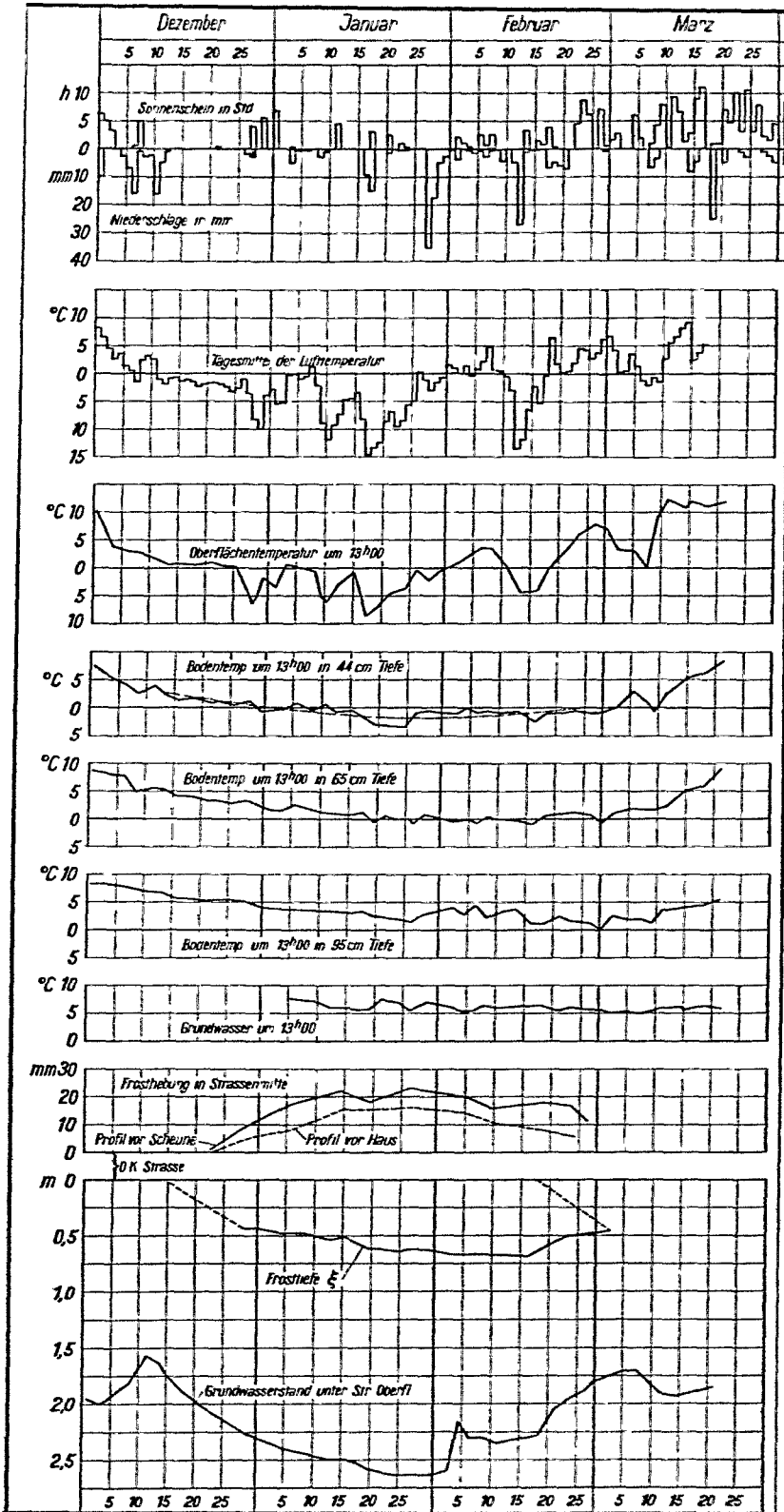


Abb. 16: Ergebnisse der Frostuntersuchungen
Luzern-Ebikon /51/

Doch können allein Versuche und ihre Auswertung noch keine allgemeingültigen Aussagen liefern. Sie bilden vielmehr die Grundlage zur rechnerischen Bestimmung der Frostdtiefe in Böden unter Berücksichtigung der speziellen klimatologischen Einflußfaktoren.

Verfahren zur Bestimmung der Frosteindringtiefe gibt es in großer Zahl. Sie sind oft sehr aufwendig und basieren durchweg auf dem Frostindex, der aus den mittleren Tagestemperaturen einer Frostperiode oder eines Winters gebildet und in Gradtagen ausgedrückt wird. Der Frostindex ist mathematisch gesehen das Integral der sich verändernden Temperatur über die Zeit bezogen auf eine Basistemperatur und geht von einer mittleren Tagestemperatur aus, die nach Kübler /53/ wie folgt bestimmt wird:

$$t_m = \frac{t_{09 \text{ Uhr}} + t_{14 \text{ Uhr}} + 2 \cdot t_{21 \text{ Uhr}}}{4}$$

Anstelle des Begriffes Frostindex wird auch die Bezeichnung Kältesumme verwendet.

Verschiedene Länder haben sogen. Frostindex-Karten aufgestellt, die einen Überblick über die regionale Verteilung der durchschnittlichen Temperaturverhältnisse im Winter und ihre Auswirkungen zulassen. Beschritten wurde dieser Weg sowohl innerhalb als auch außerhalb Europas, z.B. in Kanada, Norwegen, Schweden, in den USA und in der UdSSR sowie der DDR (vgl. Abb. 17).

Im Hinblick auf die ausreichende Standsicherheit der Bauwerke sind für eine Berechnung der Frosteindringtiefe nicht die mittleren, sondern die auf einen unter statistischen Gesichtspunkten ausgewählten Zeitraum bezogenen maximalen Werte von Bedeutung, um mit den ermittelten Werten unter allen Umständen auf der sicheren Seite zu liegen.

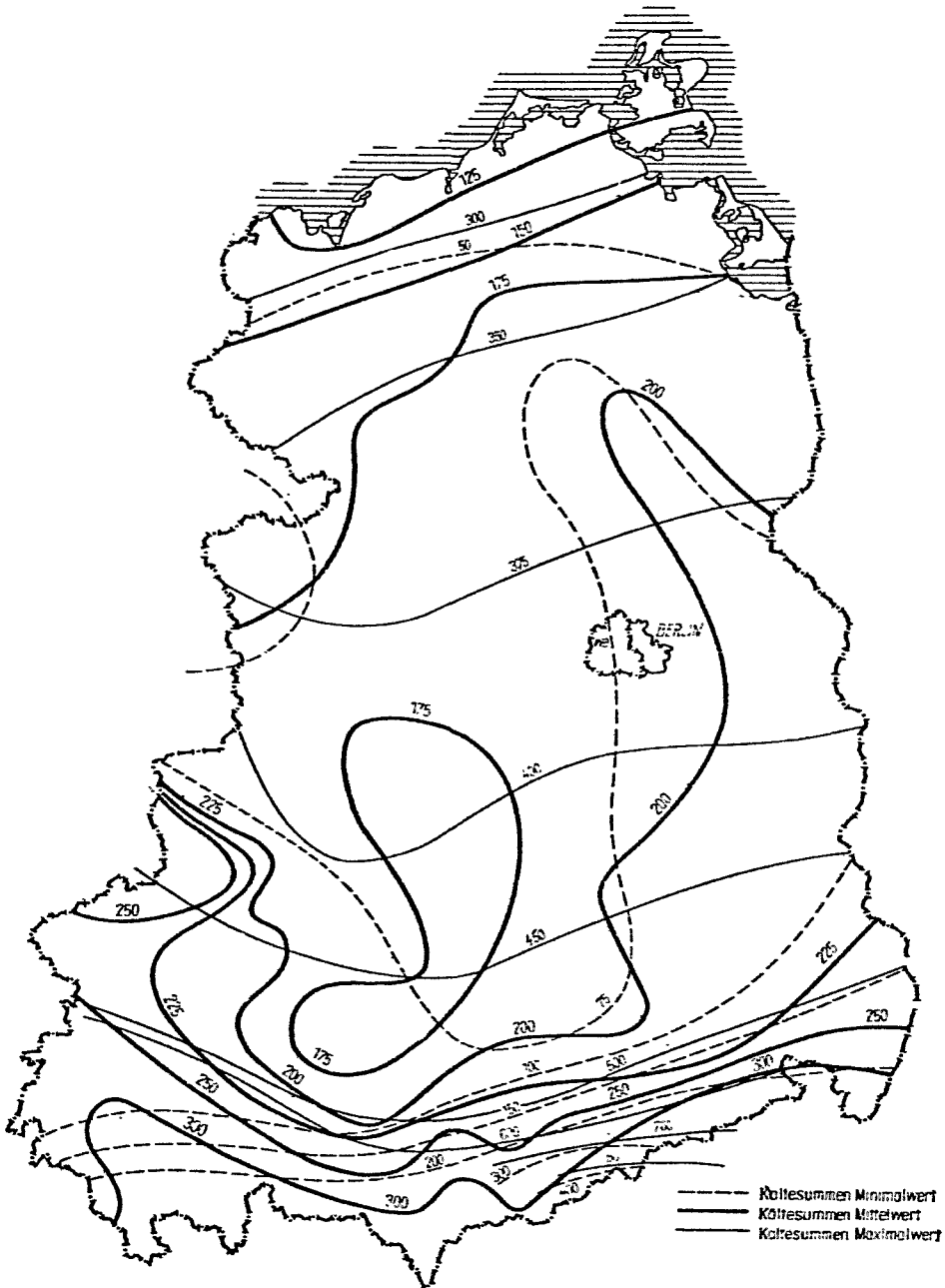


Abb. 17: Karte der minimalen, mittleren und maximalen Kältesummen im Gebiet der DDR /21/

Einen ausführlichen Überblick über Verfahren zur Berechnung der Frosteindringtiefe vermittelt die Arbeit von Jessberger /52/. Danach stammt das älteste und bekannteste Verfahren von Stefan (vgl. Abb. 18), der den Wärmefluß im gefrorenen und im ungefrorenen Boden unter Berücksichtigung der freiwerdenden Schmelzwärme betrachtete und folgende Beziehung für die Ermittlung der Frosteindringtiefe aufstellte:

$$X = 41,57 \sqrt{\frac{\lambda \cdot FI}{L}}$$

Es bedeuten:

X: Frosteindringtiefe in cm

λ : Wärmeleitfähigkeit für gefrorenen Boden
in W/(m K)

FI: Frostindex in °C · Tage

L: latente Schmelzwärme in J/cm³

Die Formel nach Stefan ergibt stets zu große Frosteindringtiefen, liegt also auf der sicheren Seite. Das liegt daran, daß die im Boden vorhandene Wärmekapazität, die bei Temperaturabnahme abgeführt werden muß, vernachlässigt wird.

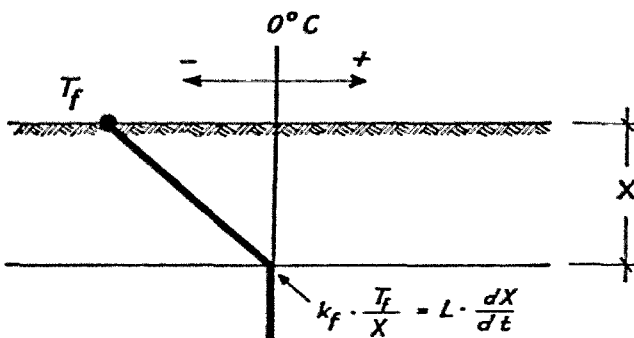


Abb. 18: Temperaturverlauf nach der STEFAN-Formel /52/

Eine genauere Berechnung der Frosteindringtiefe wird von Aldrich und Paynter durch Multiplikation des Ergebnisses der Stefan'schen Gleichung mit einem Korrekturfaktor vorgeschlagen (verbesserte BERGGREN-Formel). Nachteil dieses Verfahrens ist aber, daß die Ermittlung des Korrekturfaktors für jeden Einzelfall gesondert erfolgen muß und zusätzlich spezielle Parameter wie Temperatur und Wärmekapazität des Bodens zu bestimmen sind.

Um die praktische Anwendung zu vereinfachen, könnte der Weg der grafischen Aufbereitung in Form von Diagrammen o.ä. beschriftet werden. Als Beispiel können die aus /52/ entnommenen Diagramme dienen (Abb. 19). Sie geben Frosttiefen in Abhängigkeit vom Frostindex für Böden mit unterschiedlichen Trockenraumgewichten und Wassergehalten an und stammen aus den Richtlinien des US Corps of Engineers 1965.

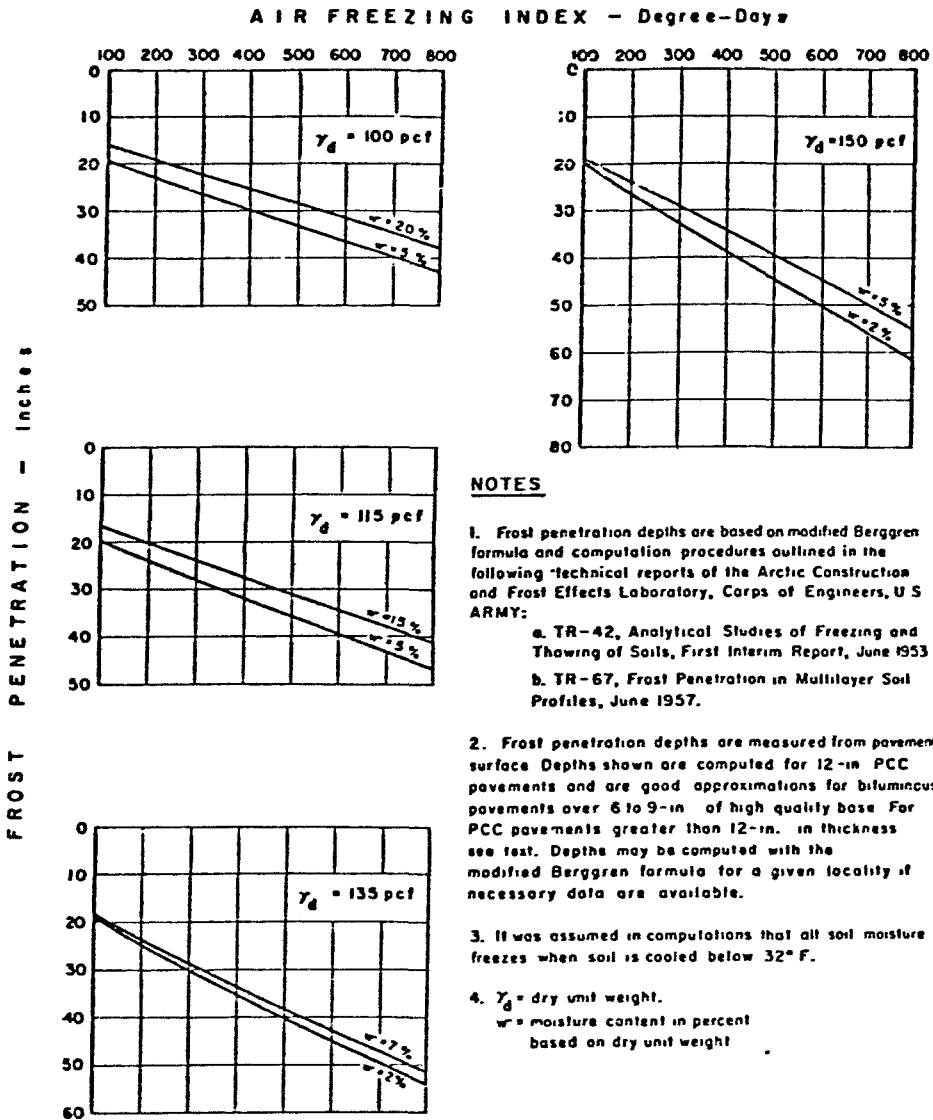


Abb. 19: Frosttiefe gegen Luft-Frostindex nach den Richtlinien des US Corps of Engineers 1965/52/

Fuchs und Klengel geben in /21/ ein Näherungsverfahren an, mit dessen Hilfe ohne großen Rechenaufwand die Frosteindringtiefe wie folgt bestimmt werden kann:

$$t_F = \alpha \sqrt[3]{\frac{K}{30}} + 2$$

mit

t_F = Frosteindringtiefe in cm

α = Faktor zur Berücksichtigung der Bodenart

K = Kältesumme

Der Wert α wird für Baugrund aus tonigen Gesteinen mit 23° , bei schluffigen Gesteinen mit 28° , bei Sanden mit 30° und bei Kiesen mit 34° angegeben. Die Kältesumme K kann problemlos einer speziellen Karte entnommen werden (vgl. Abb. 17). Wenn aus langjährigen meteorologischen Beobachtungen entsprechende Daten zur Verfügung stehen - ähnlich den Gradtagzahlen für einen 20-jährigen Beobachtungszeitraum¹⁾ -, können diese sogar direkt für den jeweiligen Ort angegeben und in die obenstehende Gleichung eingesetzt werden. Dabei empfiehlt es sich, nicht die statistischen Mittelwerte, sondern die für einen bestimmten Zeitraum ermittelten Maximalwerte als Berechnungsgrundlage zu verwenden.

4 Das thermische Verhalten des Baugrundes

4.1 Wärmetransport

Unterschiedliche Energiezustände haben stets das Bestreben, sich auszugleichen. Das bedeutet, daß unter dem Einfluß eines Temperaturgefälles ein in jedem Falle irreversibler Wärmestrom in Richtung dieses Gefälles entsteht. Bleiben dabei die Oberflächentemperaturen konstant, erfolgt die Wärmeübertragung stationär, d.h. in gleichen Zeiträumen wird durch die gleiche Fläche die gleiche Wärmemenge transportiert. Verändern sich hingegen die Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit, wie dies z.B. bei Aufheiz- und Abkühlvorgängen der Fall ist, so verändert sich die Größe des Wärmestromes. Die Strömung ist dann instationär.

Wärme kann übertragen werden durch:

- Wärmestrahlung
- Wärmeleitung
- Konvektion.

¹⁾ siehe VDI 2067. Berechnung der Kosten von Wärmeverbrauchsanlagen, Blatt 1, Dezember 1979

4.1.1 Wärmestrahlung

Unter Strahlung versteht man die Übertragung von Wärme ohne materiellen Wärmeträger in Form elektromagnetischer Wellen. Beim Auftreffen auf einen Körper wird diese Strahlungsenergie absorbiert, wobei sich schwarze und rauhe Körper starker erwärmen als solche mit hellen und glatten Oberflächen.

Wärmetransportvorgänge in Form von Strahlung spielen an der Bodenoberfläche eine wesentliche, im Boden selbst jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

4.1.2 Wärmeleitung

Der Vorgang der Wärmeleitung besteht darin, daß in festen Körpern sowie in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen die Wärme jeweils von einem Molekül an das andere weitergegeben wird.

Im Baugrund ist die Leitung der dominierende Wärmetransportvorgang. Vor allem in Böden, in denen keine oder nur wenig Poren vorhanden sind, die untereinander und mit der atmosphärischen Luft zusammenhängen, ist die Wärmeleitung ein entscheidender Faktor.

4.1.3 Konvektion

Bewegte Gase und Flüssigkeiten, die entweder durch Temperaturdifferenzen oder durch äußere Kräfte umgewälzt werden, führen Wärme mit sich fort. Eine Wärmeleitung von Molekül zu Molekül ist diesem Vorgang überlagert.

Die Konvektion im Boden ist von Menge, Fließgeschwindigkeit und Wärmekapazität des die Wärme transportierenden Mediums abhängig, wobei als Transportmedium Wasser in flüssigem oder gasförmigem Zustand in Frage kommt. Da sich das Grundwasser in den meisten Böden nur relativ wenig bewegt und auch die Temperaturunterschiede in den von ihm passierten

Bereich klein sind, tritt die Konvektion bei flüssiger Phase des Transportmediums in ihrer Bedeutung stark hinter den Wasserdampftransport zurück.

Wenn dieser durch hinreichend zusammenhängende Luftvolumina möglich ist, kann er in den obersten zwei Zentimetern des Bodens 40 bis 60% des gesamten Wärmetransportes ausmachen /14/. Wasserdampf- und Wärmetransport sind in Böden mit kontinuierlicher Gasphase eng miteinander gekoppelt.

4.2 Wärmekapazität

Der Baugrund enthält stets wie auch jeder andere Stoff oberhalb des absoluten Nullpunktes ($-273,15^{\circ}\text{C}$) eine bestimmte Wärmemenge, die sich durch die Temperatur als das Maß für die Erwärmung bemerkbar macht. In ihrer absoluten Größe ist diese Wärmemenge sehr schwer zu erfassen. Sie wird daher auf die Temperaturänderung bezogen und im allgemeinen auch auf die Volumeneinheit. Diese bezogene Größe wird bezeichnet als Wärmekapazität C und gibt die Wärmemenge an, die bei 1 cm^3 eines bestimmten Stoffes eine Temperaturveränderung von 1 K hervorruft, und zwar in der Form, daß diese Wärmemenge bei einer Temperaturerhöhung dem Boden zugeführt und bei der Abkühlung wieder entzogen wird. Damit lautet die Einheit der Wärmekapazität C :

$$\text{J}/(\text{cm}^3\text{ K}).$$

Die Wärmekapazität ist darüber hinaus definiert als das Produkt aus der Dichte ρ in kg/cm^3 und der spezifischen Wärmekapazität c in $\text{J}/(\text{kg K})$:

$$C = \rho \cdot c.$$

Die spezifische Wärme der im Boden enthaltenen anorganischen Stoffe ist unter baupraktischen Gegebenheiten als nahezu konstant anzusehen /55/. Als Mittelwert kann gelten:

$$c = 880\text{ J}/(\text{kg K}).$$

Auch für die Trockenrohdichte der verschiedenen Bodenarten kann mit hinreichender Genauigkeit von einem Mittelwert ausgegangen werden. Es gilt:

$$\rho_t = 1,8 \text{ g/cm}^3.$$

Damit kann bei allen trockenen Böden mit folgender Wärmekapazität C_t gerechnet werden:

$$C_t \sim 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 880 = 1,58 \text{ J/(cm}^3 \cdot \text{K)}.$$

Neben der Dichte und der stofflichen Zusammensetzung der festen Bestandteile hängt die Wärmekapazität vom Wassergehalt ab. Es gilt folgende Beziehung:

$$C_f = \rho_t \left(c_B + \frac{c_W \cdot w}{100} \right)$$

mit

- C_f = Wärmekapazität des feuchten Bodens in $\text{J/(cm}^3 \cdot \text{K)}$
- ρ_t = Trockenrohdichte in g/cm^3
- c_B = spezifische Wärme des trockenen Bodens in J/(kg K)
- c_W = spezifische Wärme von Wasser (flüssig oder fest) in J/(kg K)
- w = Wassergehalt in %.

Da die spezifische Wärme - jeweils bei 0°C - von Wasser 4186 J/(kg K) und von Eis nur 2115 J/(kg K) beträgt, ist die Wärmekapazität des ungefrorenen Bodens bei gleichem Wassergehalt immer größer als die des gefrorenen Bodens (vgl. Abb. 20).

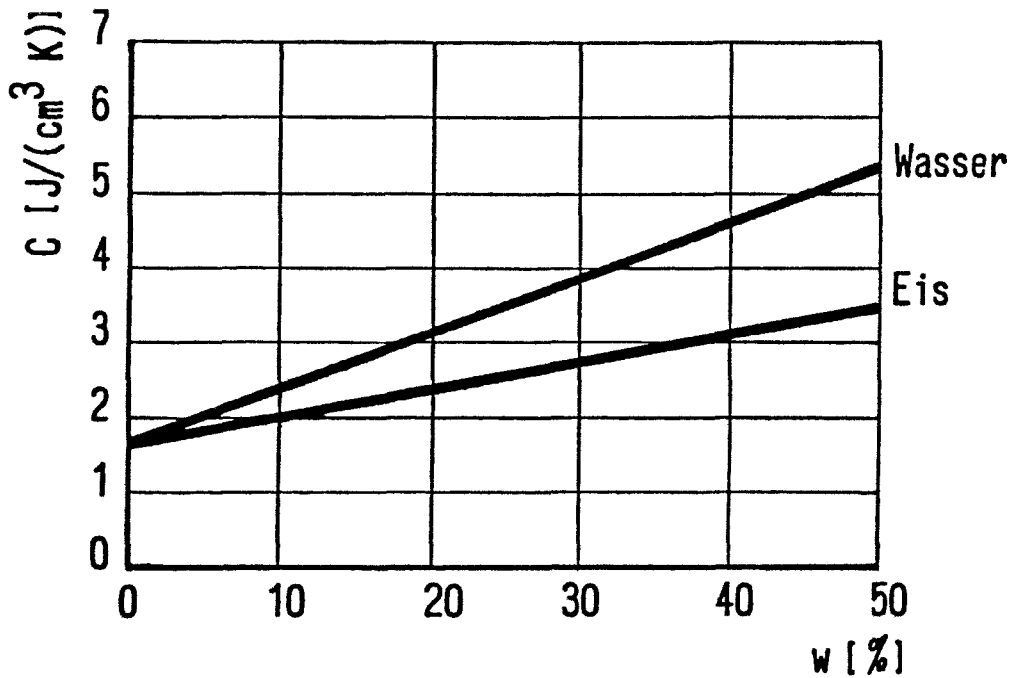


Abb. 20: Wärmekapazität C eines feuchten Bodens ($\rho_t = 1,8 \text{ g/cm}^3$) in Abhängigkeit vom Wassergehalt

4.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Bodens hängt aufgrund seiner inhomogenen Struktur von einer Reihe von Einflußgrößen ab. Im wesentlichen sind dies die stoffliche Zusammensetzung der festen Bestandteile, das Porenvolumen, der Wassergehalt und die Temperatur des Bodens. Den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit - hier mit K bezeichnet -, Porenvolumen, spezifischem Gewicht und Wassergehalt eines ungefrorenen Bodens zeigt Abb. 21 auf.

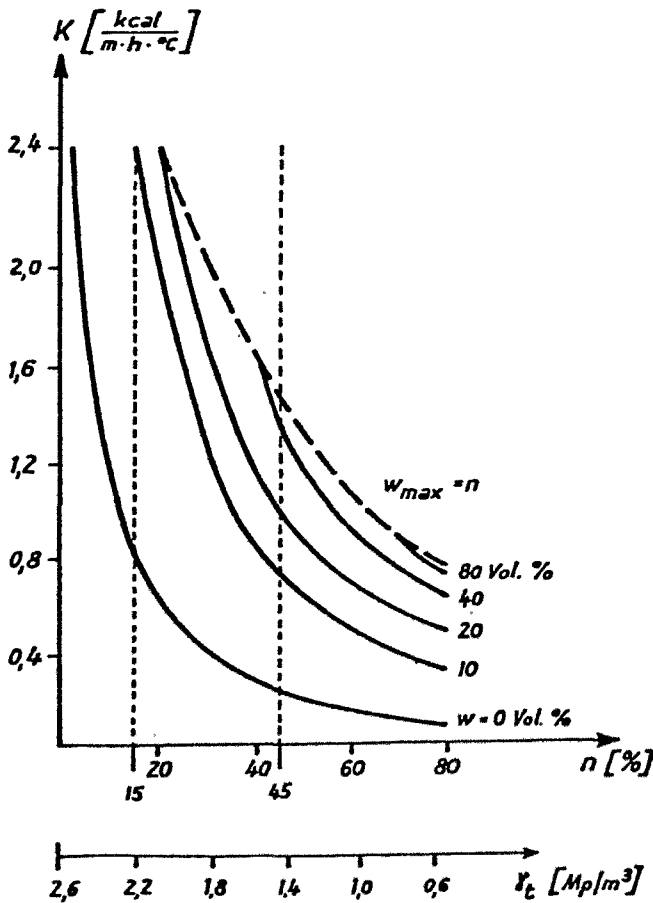


Abb. 21: Abhängigkeit der Wärmeleit-
zahl von Porenvolumen, Raum-
gewicht und Wassergehalt für
ungefrorenen Boden nach
Jumikis /52/

Wenn der Boden kein Wasser enthält, ist die Wärmeleitfähigkeit jeweils am kleinsten, weil die Wärme praktisch nur über das Korngerüst weitergeleitet wird. Das beruht darauf, daß die mit Luft gefüllten Poren kaum an der Wärmeübertragung beteiligt sind. Doch schon bei geringen Wassergehalten verteilt sich das Wasser als dünner Film über die gesamte Kornoberfläche und zusätzlich ringförmig um die Berührungspunkte der einzelnen Bodenkörner, so daß geringe Wassergehalte die Wärmeleitfähigkeit beträchtlich erhöhen. Diese Erscheinung beruht darauf, daß die für den

Wärmestrom maßgeblichen leitenden Querschnitte durch die ringförmige Wasseranlagerung zunächst überproportional vergrößert werden. Je mehr Wasser aber der Boden enthält, desto weniger nimmt der leitende Querschnitt zwischen den Körnern und damit auch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens zu.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Bodenkenngößen und die komplizierten Wärmeübertragungsvorgänge im feuchten Erdreich würden jeweils eine exakte Analyse des Bodens zumindest hinsichtlich der Bodenzusammensetzung, des Porenvolumens und des Wassergehaltes erfordern. Es liegt auf der Hand, daß ein derartig aufwendiges Vorgehen in der Praxis ausscheidet.

Jedoch sind sowohl in der einschlägigen Fachliteratur als auch den DIN-Normen Werte für die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens enthalten. J.S. Cammerer /24, 55/ nennt die folgenden Wärmeleitfähigkeiten, wobei die unterschiedliche Porosität durch Angabe von zwei Raumgewichten Berücksichtigung findet:

- reiner Sand

$$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \lambda = 1,05 \text{ W/(m K)}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \lambda = 1,74 \text{ W/(m K)}$$

- toniges Erdreich

$$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \lambda = 1,51 \text{ W/(m K)}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \lambda = 2,56 \text{ W/(m K)}.$$

Der Wassergehalt in Vol.-% wird für durchschnittliche Bauverhältnisse für sandiges Erdreich mit 8% und für toniges Erdreich mit 23% angegeben.

Nach DIN 4108 in der Fassung vom August 1981 gelten für Böden im "naturfeuchten" Zustand als Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit:

- Sand, Kiessand $\longrightarrow \lambda = 1,4 \text{ W/(m K)}$
- bindige Böden $\longrightarrow \lambda = 2,1 \text{ W/(m K)}$.

4.4 Temperaturleitfähigkeit

Zur Beschreibung instationärer Wärmeleitvorgänge, wie sie durch Temperaturveränderungen in Abhängigkeit von der Zeit im Boden entstehen, wird die Temperaturleitfähigkeit benutzt. Sie ist definiert als Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität und hat die Einheit cm^2/s .

Wie bereits erläutert, steigen die Werte für die Wärmeleitfähigkeit und auch die Wärmekapazität, wenn der Wassergehalt des Bodens zunimmt. Da die Kapazität bei Wasserzufuhr gleichmäßig ansteigt, während die Leitfähigkeit zunächst stark und bei höherem Wassergehalt nur noch schwach zunimmt, nimmt die Temperaturleitfähigkeit einen uneinheitlichen Verlauf. Sie steigt bereits bei geringer Wasserzugabe stark an und erreicht bei einem Wassergehalt von ca. 15 Vol.-% ihr Maximum, um dann wieder langsam abzusinken (Abb. 22).

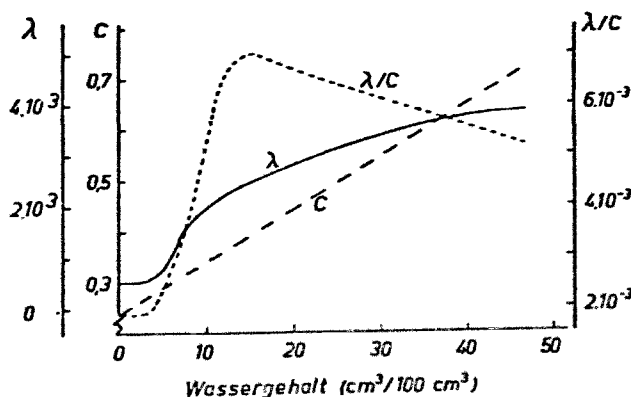


Abb. 22: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{cal/cm sec } ^\circ\text{C}$], Wärmekapazität C [$\text{cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$] und der Temperaturleitfähigkeit λ/C [cm^2/sec] in Abhängigkeit vom Wassergehalt nach Bolt /14/

Eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit geht im Boden also nicht zwangsläufig mit einem verstärkten Transport thermischer Energie einher. Wenn nämlich die Bodenoberfläche aufgrund einer hohen Wärmekapazität nur eine geringe Erwärmung bzw. Abkühlung erfährt, wird entsprechend wenig Wärme weitergeleitet, da die Größe des Wärmestromes auch vom Temperaturgefälle abhängt. Damit werden die angrenzenden Bodenschichten nur geringfügig erwärmt bzw. abgekühlt, auch wenn die Wärmeleitfähigkeit im Verhältnis stark zugenommen hat.

4.5 Zeitlich bedingte Schwankungen der Erdoberflächentemperatur

Im Zusammenspiel mit den täglichen und jährlichen periodischen Schwankungen des Klimas kommt es zu typischen Temperaturgängen im Boden. Entsprechend dem steten Wechsel der Strahlungsintensität mit der Tages- und der Jahreszeit verlaufen diese Temperaturgänge sinusförmig. Mit zunehmender Tiefe wird die Weitergabe der Temperaturschwankungen zeitlich verzögert (Phasenverschiebung) und die Schwankungsbreite verringert (Temperaturamplitudendämpfung). Wesentliche Einflußfaktoren sind dabei die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit bzw. der Quotient aus beiden Größen, die Temperaturleitfähigkeit. Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung für einen Tagesgang sind in Abb. 23 am Beispiel eines Sand- und eines Hochmoorbodens dargestellt.

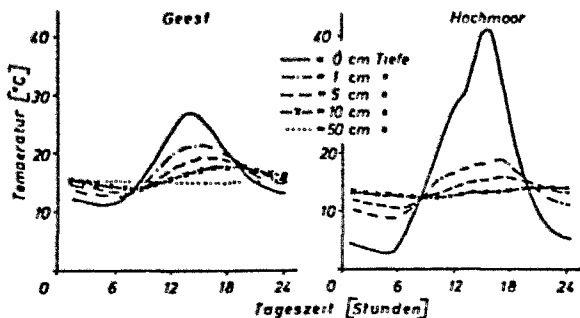


Abb. 23: Tagesgang der Bodentemperatur bis in 50 cm Tiefe in einem Sandboden und einem Hochmoorboden in Norddeutschland während einer Hochdruckperiode im August (Miess, 1968) /14/

Allgemein gilt, daß die täglichen Temperaturschwankungen je nach Bodenart in bis zu 1,00 m Tiefe abklingen, wobei die Phasenverschiebung bis zu 12 Stunden betragen kann. Die täglichen Temperaturschwankungen überlagern die jahreszeitlich bedingten Temperaturgänge und werden in 50 cm Tiefe schon sehr klein. In 12 - 20 m Tiefe sind auch die jahreszeitlichen Schwankungen kaum noch wahrnehmbar (Abb. 24). Liegt der Grundwasserspiegel auf einem höheren Niveau als die genannte Grenztiefe, so ist bereits hier mit Temperaturkonstanz im Boden zu rechnen.

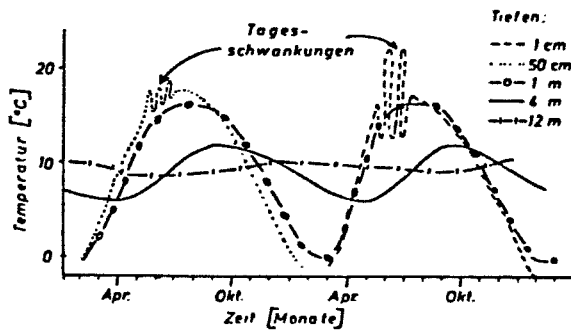


Abb. 24: Verlauf der Temperaturgänge in einem Boden im Ablauf von zwei Jahren in unterschiedlicher Tiefe. Die tageszeitbedingten Schwankungen sind für 1 cm Tiefe auf dem rechten Zyklus, für 50 cm Tiefe auf dem linken Zyklus aufgetragen./14/

Es ist also zu überlegen, in welcher Weise das thermische Verhalten eines Bodens beeinflußt werden kann. Dies kann allgemein ausgedrückt entweder durch erhöhte Wärmezufuhr oder durch eine Veränderung von Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit geschehen. Zusätzliche Wärme kann dem Boden zugeführt werden durch bessere Nutzung der einstrahlten Sonnenenergie (Erhöhung der Absorption über die Bodenfarbe) oder durch Beheizung in direkter oder indirekter Form, während die Wärmeleitfähigkeit des Bodens durch den Einsatz entsprechender Dämmstoffe verringert werden kann.

5 Thermische Verhältnisse unter flachgegründeten beheizten Gebäuden

5.1 Ergebnisse aus Messungen

Wie in Abschnitt 4.5 erläutert wurde, entsteht durch die jahreszeitlich bedingten Temperaturgänge im Boden ein sich mit der Zeit veränderndes Temperaturfeld, das bis in eine Tiefe von etwa 12 m reicht; es sei denn, der Grundwasserspiegel bewirkt bereits in geringer Tiefe eine Temperaturkonstanz. Diesem Temperaturfeld wird unter flachgegründeten beheizten Gebäuden ein zweites, durch die indirekte Beheizung über die Sohlplatte erzeugtes Feld überlagert. Bei schwankenden Temperaturen im Innern des Gebäudes ist auch dieses zweite Feld instationär.

Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Temperaturverhältnisse unter flachgegründeten Gebäuden ohne Keller wurden in Skandinavien schon vor mehreren Jahren durchgeführt. Ihre wichtigsten Ergebnisse sollen an dieser Stelle wiedergegeben werden.

Vuorelainen /39/ führte Ende der 50er Jahre an insgesamt vier nichtunterkellerten Häusern Messungen durch, und zwar waren drei Häuser mit einer in die Sohlplatte integrierten Fußbodenheizung versehen, während das vierte Haus über Radiatoren beheizt wurde. Die Meßergebnisse bestätigten die Resultate der theoretischen Berechnungen /39, 40/ und gaben Aufschluß darüber, ob und inwieweit eine Frostgefährdung bei flachgegründeten Gebäuden mit Gründungstiefen, die unter den in DIN 1054 geforderten 80 cm liegen, existiert.

Abbildung 25 gibt die gemessene Temperaturverteilung im Erdreich unterhalb des mit Radiatoren beheizten Gebäudes an einem Wintertag des Jahres 1959 wieder. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Frostgrenze (0°C -Linie) die Gründung in

keiner Weise beeinflusst, während die durchschnittliche Oberflächentemperatur des Fußbodens bei $+18^{\circ}\text{C}$ liegt. Wie zu erwarten, nimmt der Wärmefluß Q_G ins Erdreich zum Rand hin beträchtlich zu. Diese Erscheinung ist auf die erhöhten Wärmeverluste in den Randbereichen der Sohlplatte zurückzuführen und hängt damit zusammen, daß hier Wärme über die oberen Bodenschichten an die Umgebungsluft abgegeben wird.

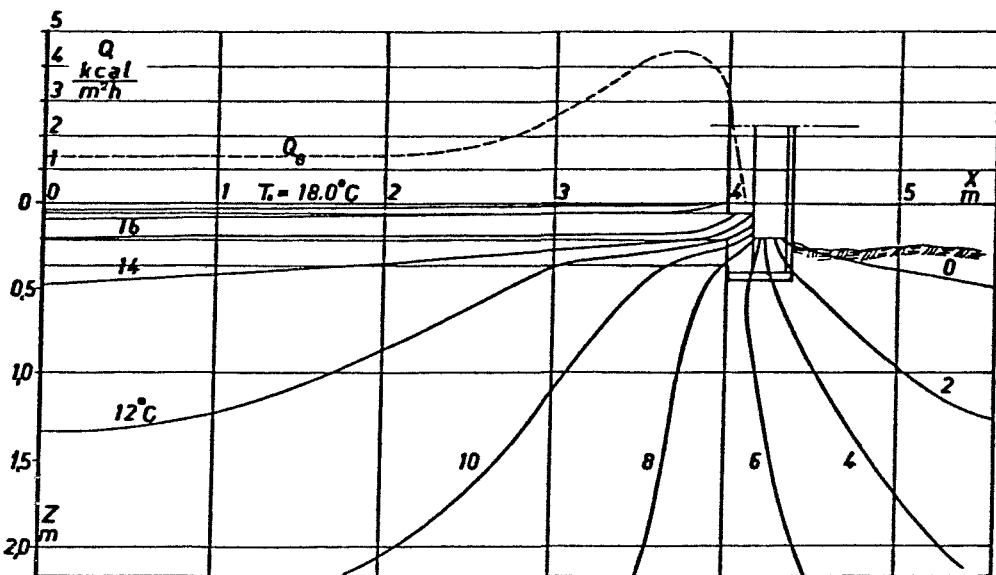


Abb. 25: Gemessene Temperaturverteilung im Erdreich unter einem finnischen Versuchshaus mit Radiatorenheizung /39/

Abbildung 26 zeigt ein Temperaturfeld unterhalb eines Versuchshauses mit Fußbodenheizung. Man erkennt, daß durch die direkte Beheizung der Sohlplatte das Erdreich in wesentlich stärkerem Maße erwärmt wird als im zuvor beschriebenen Beispiel. Die Frostgrenze liegt außerhalb des Gebäudes und nähert sich stark der Geländeoberfläche.

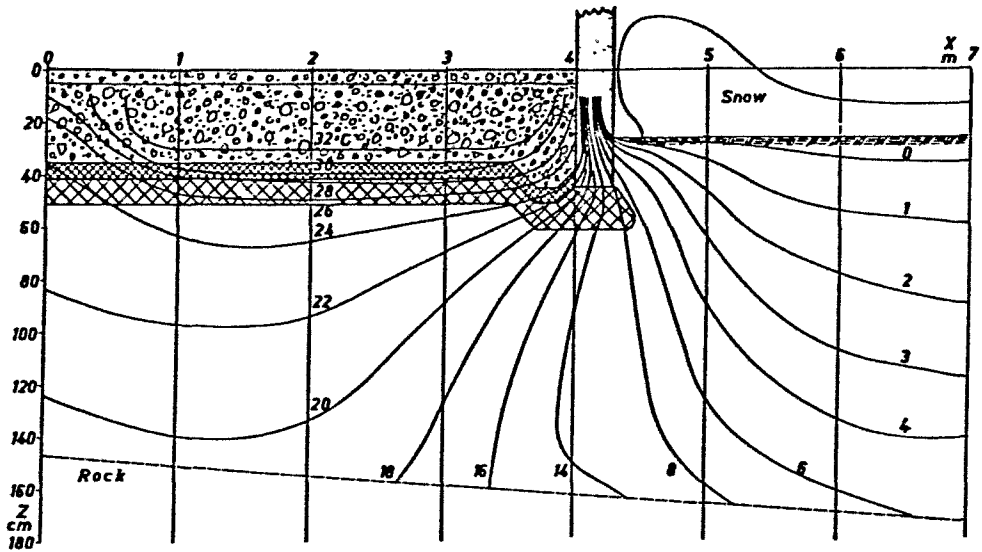


Abb. 26: Gemessene Temperaturverteilung
im Erdreich unter einem finnischen
Versuchshaus mit Fußbodenheizung /39/

Auch hier steigt die Größe des Wärmeflusses zum Rand hin an (Abb. 27). Anzumerken ist allerdings, daß die Werte für die Größe des Wärmeflusses wesentlich höher liegen als im Fall der Radiatorenheizung.

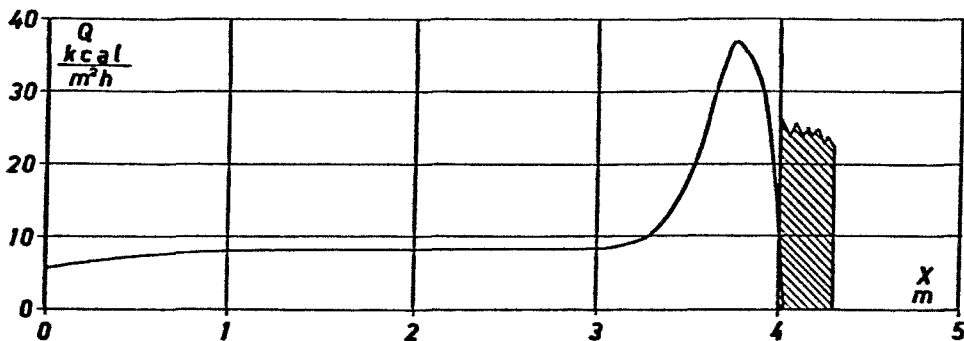
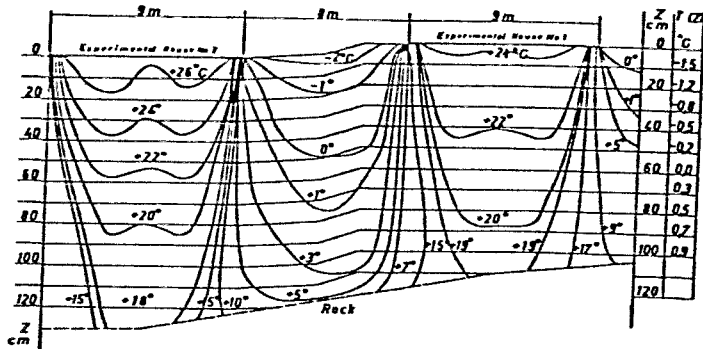


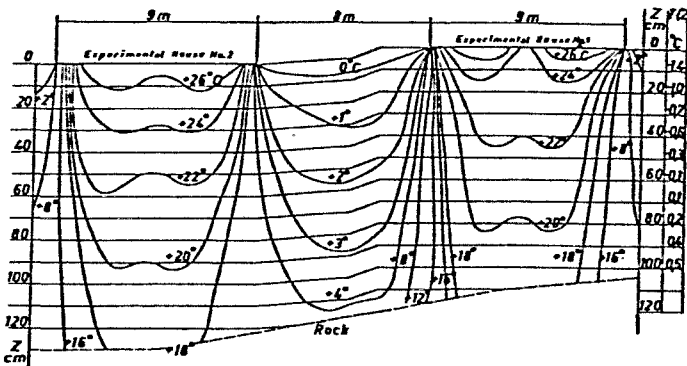
Abb. 27: Wärmefluß ins Erdreich bei einem
finnischen Versuchshaus mit Fuß-
bodenheizung /39/

Die Abbildung 28 schließlich zeigt Temperaturfelder, die sich im Erdreich unter und zwischen den Versuchshäusern 1 und 2 bei unterschiedlichen Innen- und Außentemperaturen einstellen. Die Temperaturangaben $T(Z)$ in der rechten Spalte sind Vergleichswerte in Abhängigkeit von der Bodentiefe und

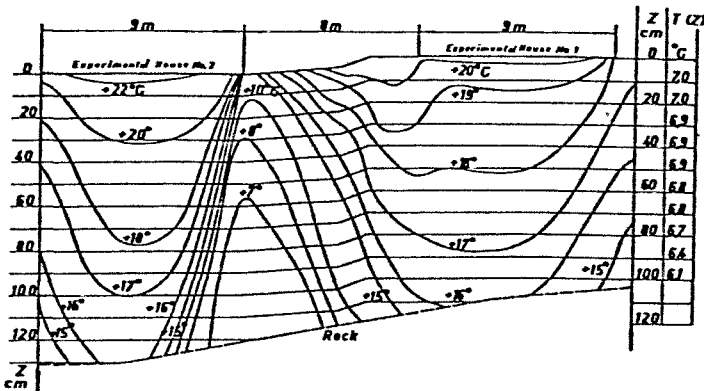
wurden in 30 m Entfernung von den Versuchshäusern gemessen. Sie stellen also Werte für den "ungestörten" Bereich dar und unterscheiden sich zum Teil erheblich von den Bodentemperaturen im "gestörten" Bereich zwischen den beiden Häusern.



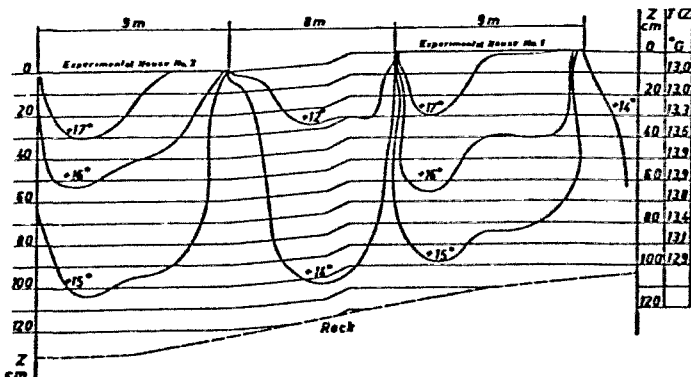
28.1



28.2



28.3



28.4

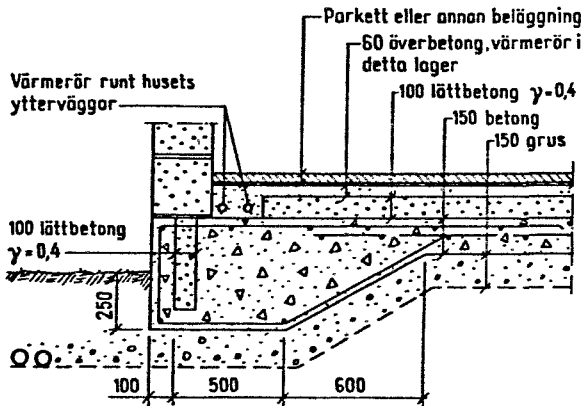
Abb. 28: Gemessene Temperaturverteilung im Erdreich unter und zwischen zwei finnischen Versuchshäusern mit Fußbodenheizung /39/

Abbildung 28.1 gibt die Verhältnisse an einem Wintertag im Januar wieder, wobei der Bereich zwischen den beiden Häusern mit einer dünnen festgetretenen Schneeschicht bedeckt war.

Abbildung 28.2 bezieht sich auf einen Wintertag im März. Der Schnee zwischen den Häusern liegt 40 - 60 cm hoch und wirkt in gewisser Weise als Wärmedämmung, so daß zwischen den beiden Häusern nur noch in unmittelbarer Nähe zur Bodenoberfläche Frosteinwirkungen zu verzeichnen sind.

Abbildung 28.3 ist eine Darstellung des Temperaturfeldes direkt nach Beendigung der Heizperiode im Mai, während Abb. 28.4 die Temperaturverteilung im August vor dem Beginn der nächsten Heizperiode angibt. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich das Erdreich allmählich abkühlt und zunehmend eine "Glättung" des Temperaturfeldes eintritt.

Messungen der Temperaturverteilung im Erdreich wurden an einem flachgegründeten nichtunterkellerten Versuchshaus in Schweden von Domnér und Rönning /57/ in den Jahren 1955 - 1959 durchgeführt. Die Gründung erfolgte mit einer unter den Außenwänden verstärkten Stahlbeton-Sohlplatte, auf die mit Ausnahme eines schmalen Streifens im Bereich der Außenwände eine 10 cm dicke Schicht aus Leichtbeton aufgebracht worden war (vgl. Abb. 29). Das Gebäude war mit einer Fußbodenheizung ausgestattet, was dazu führte, daß sich die Erdreichtemperatur unterhalb der Sohlplatte etwa bei $+20^{\circ}\text{C}$ einpendelte.



Värmerör runt husets ytterväggar = Heizschlangen längs der Außenwände
 Lättbetong = Leichtbeton
 Parkett eller annan beläggning = Parkettfußboden o.ä.
 Överbetong, värmerör i detta lager = Estrich mit Heizschlangen
 Betong = Beton
 Grus = Kies

Abb. 29: Sohlplatte eines schwedischen Versuchshauses /57/

Insgesamt an 29 Meßpunkten innerhalb wie außerhalb des Hauses (Abb. 30) wurden während eines Zeitraumes von 4 Jahren die Temperaturen erfaßt und aufgezeichnet. Aufgetragen sind die Meßergebnisse in Abb. 31.

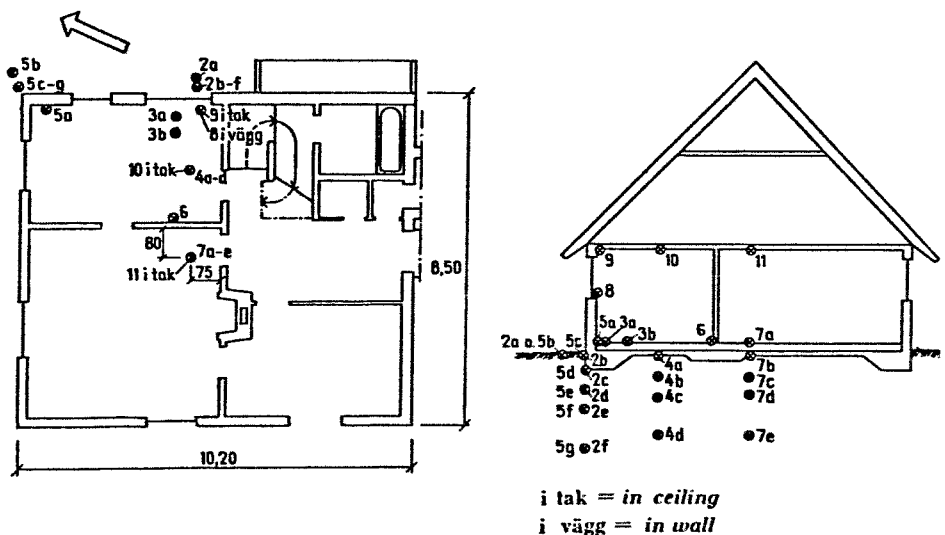
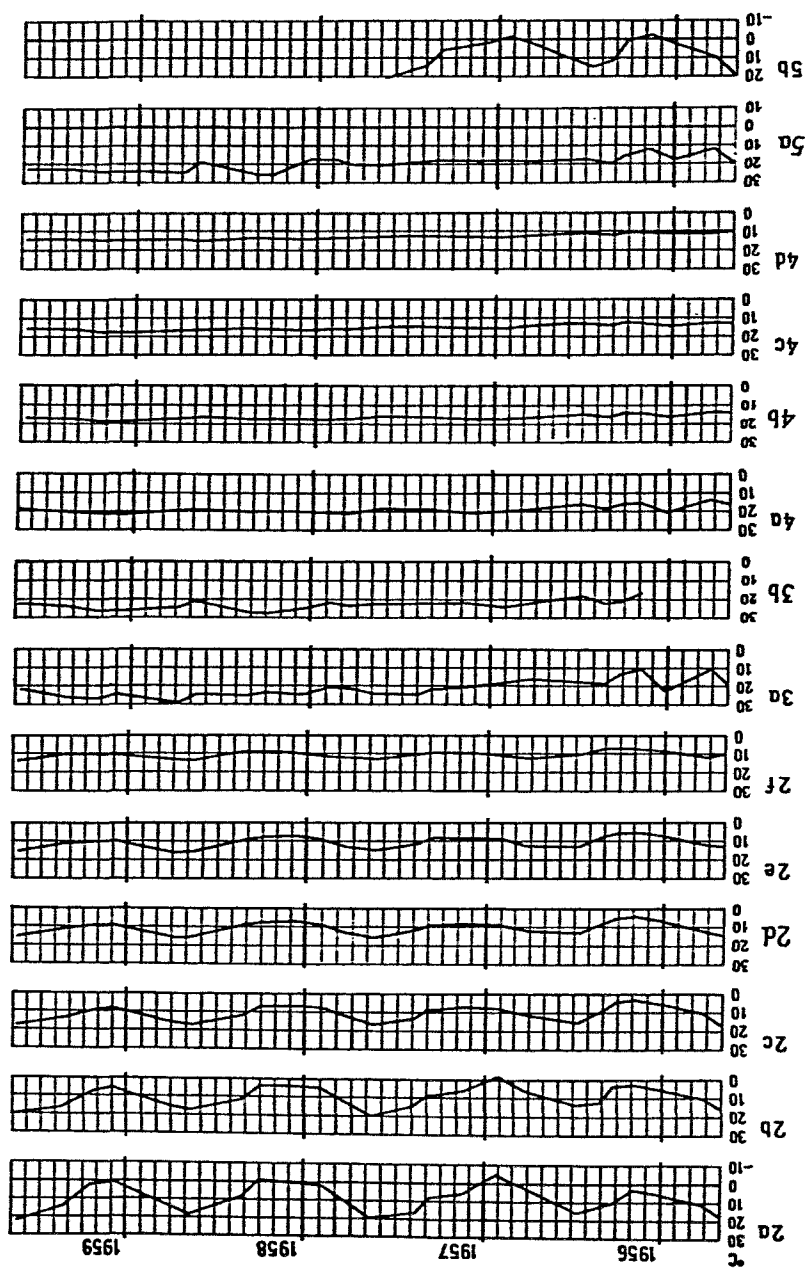


Abb. 30: Lage der Meßpunkte (zur Erläuterung von Abb. 31) /57/

Abb. 31a: Meßergebnisse an einem schwedischen Versuchshaus (Meßpunkte 2a bis 5b) / 57/



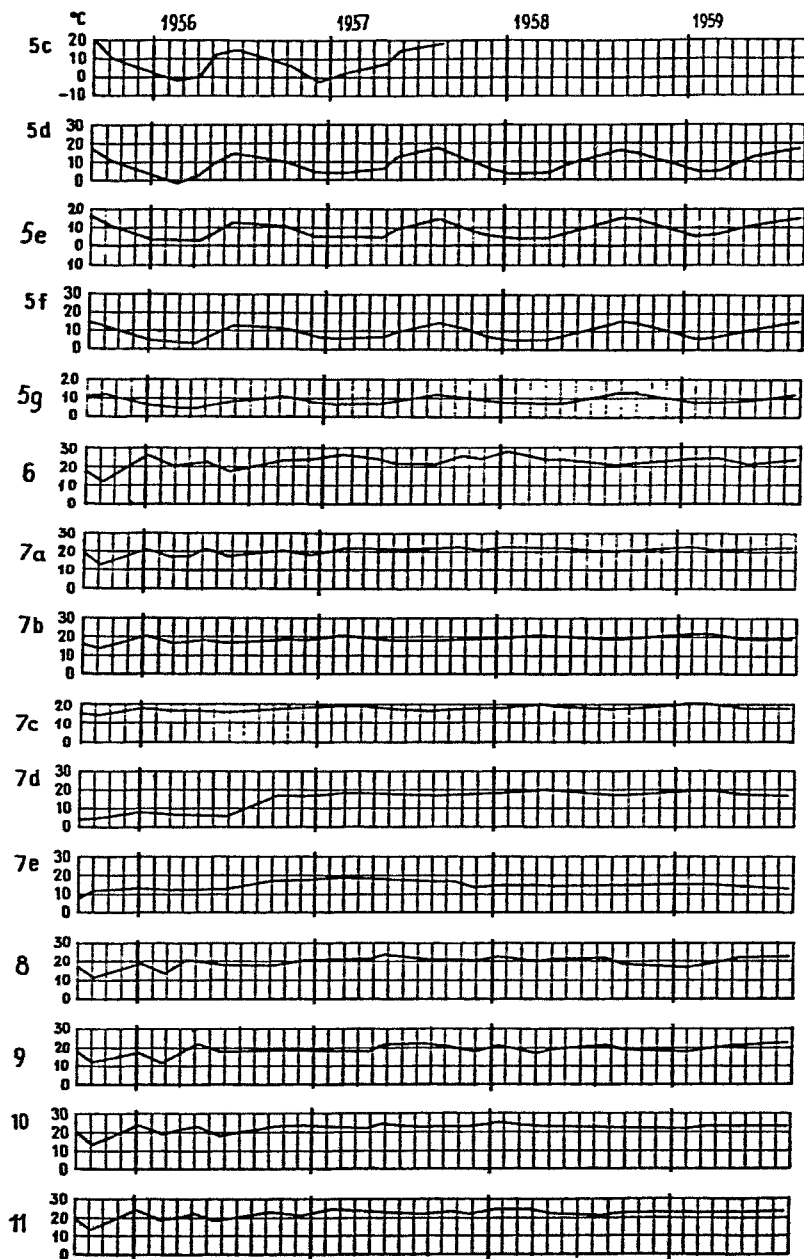


Abb. 31b: Meßergebnisse an einem schwedischen Versuchshaus (Meßpunkte 5c bis 11) /57/

Ein Studium der Temperaturkurven zeigt, daß Frost unter der Sohlplatte nur in einem einzigen Fall auftrat, nämlich bei Punkt 5d im Eckbereich des Hauses während der ersten Heizperiode. Ansonsten lagen die Temperaturen stets über dem Nullpunkt. Ein Vergleich der Kurven untereinander läßt deutlich die unter Punkt 4.5 beschriebene Dämpfung der zeitabhängigen Temperaturschwankungen im Erdreich sowie den glättenden Einfluß des durch die Beheizung erzeugten Temperaturfeldes erkennen.

6 Frostschutz im Straßenbau

Beim Bau von Straßen müssen ebenso wie im Hochbau Maßnahmen ergriffen werden, die einen ausreichenden Schutz gegen Frosteinwirkungen gewährleisten. Diese Maßnahmen sollen die Eislinsenbildung unterdrücken oder zumindest unschädlich machen und wirken sich gleichzeitig auf die Dimensionierung der Straßenbefestigung aus.

6.1 Herkömmliche Frostschuttschichten

Die älteste und auch am häufigsten praktizierte Maßnahme zur Vermeidung von Frostschäden ist der Einbau einer speziellen Frostschuttschicht, die dabei gleichzeitig als Tragschicht fungiert. Auch unter ungünstigen Bedingungen soll diese Schicht noch ausreichend große Scherfestigkeitsreserven besitzen, um z.B. während der Auftauperiode den vorübergehenden Tragfähigkeitsverlust des Untergrundes zu kompensieren. Daraus folgt, daß an die Kornverteilung des Frostschuttsmaterials besondere Anforderungen gestellt werden.

Die Frostsicherheit der Frostschuttschicht bleibt nur dann erhalten, wenn vom Erdplanum her kein frostempfindlicher Boden in die Frostschuttschicht eindringen und sich mit ihr vermischen kann. Die Frostschuttschicht muß also ausreichend filterstabil sein. Durch hinreichend große Porenräume und eine entsprechende Verteilung muß gewährleistet sein, daß einerseits Sickerwasser abfließt und andererseits keine Feuchtigkeit aus dem Untergrund bzw. Unterbau durch Kapillarkwirkung in den Oberbau gesaugt wird. Sind die Filterkriterien nicht erfüllt, ist die Zwischenschaltung einer Filterschicht erforderlich.

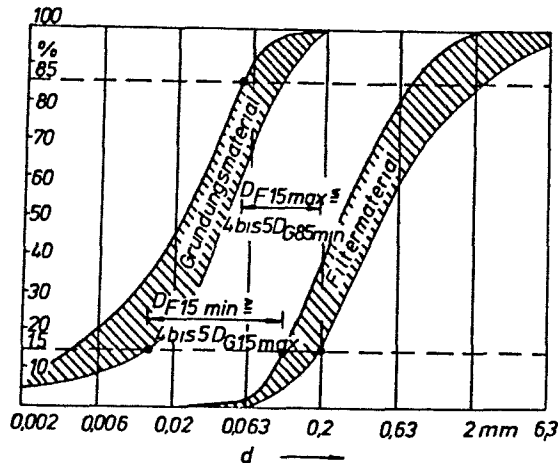


Abb. 32: Filterkriterium nach Terzaghi /60/

Frostlinsenbildung und daraus resultierende Formveränderungen können sicher vermieden werden durch Abtragen des frostempfindlichen Bodens und Einbringen frostunempfindlicher Stoffe. Nach ZTVE-StB 76 /9/ sind folgende Materialien als frostsicher anzusehen:

- Kiese und Kies-Sand-Gemische (GE, GI, GW)
- Sande und Sand-Kies-Gemische (SE, SI, SW)
- Brechsand-Splitt-Gemische 0/5 bis 0/32 mm
- Brechsand-Splitt-Schotter-Gemische 0/32 bis 0/56 mm,

wobei die beiden letzten Korngemische gebrochenes Gestein, Hochofenschlacke oder Lavaschlacke enthalten und anstelle von Brechsand auch Natursand zugegeben werden darf.

Die Erfahrungen haben gezeigt, daß ein Ersatz des frostempfindlichen Bodens bis hin zur vollen Frosttiefe nicht erforderlich ist. Wenn auf unseren Straßen die frostempfindlichen Stoffe bis in eine Tiefe von 50 bis 80 cm unter der Fahrbahnoberkante durch frostunempfindliche ersetzt werden, weisen diese im allgemeinen keine Frostschäden auf, auch wenn der Boden unter der Frostschutzschicht durchfriert.

6.2 Substitution von Frostschutzschichten

Wie Untersuchungen im Labor und auf Versuchsstraßen ausweisen, kann frostempfindlicher Boden durch Zugabe eines Binde-

mittels frostunempfindlich gemacht werden. Als Bindemittel kommen vor allem Zement und Kalk in Frage.

Frostversuche mit kalkstabilisierten Bodenproben in Österreich haben gezeigt, daß derartige Böden durch Frost kaum in Mitleidenschaft gezogen werden, wobei sich vor allem das Langzeitverhalten positiv veränderte. Die im Labor vorgenommenen Erkenntnisse waren Grundlage für den Bau verschiedener Teststrecken zur Erprobung neuartiger Fahrbahnaufbauten, bei denen die herkömmliche Frostschutzschicht teilweise und später auch gänzlich durch mit Kalk stabilisiertem Boden ersetzt wurde. Hierzu wurde der bindige Untergrund im mixed-in-place-Verfahren lagenweise unter Beigabe von 4 bis 5% Branntkalk stabilisiert.

Homann berichtet in /61/ von zwei Fällen, in denen die Frostschutzschicht herkömmlicher Art erfolgreich durch mit Kalk stabilisierte bindige Böden substituiert worden ist. So wurde 1975 bei einem Teilstück der Landesstraße L 217 in der Nähe von Trautmannsdorf (Steiermark) auf 200 m Länge die Frostschutzkiesschicht durch 3 x 20 cm mit Kalk stabilisierte Lehmlagen ersetzt. Die Fahrbahn bestand aus einer insgesamt 18 cm dicken Asphalttrag- und Deckschicht (Abb. 33).

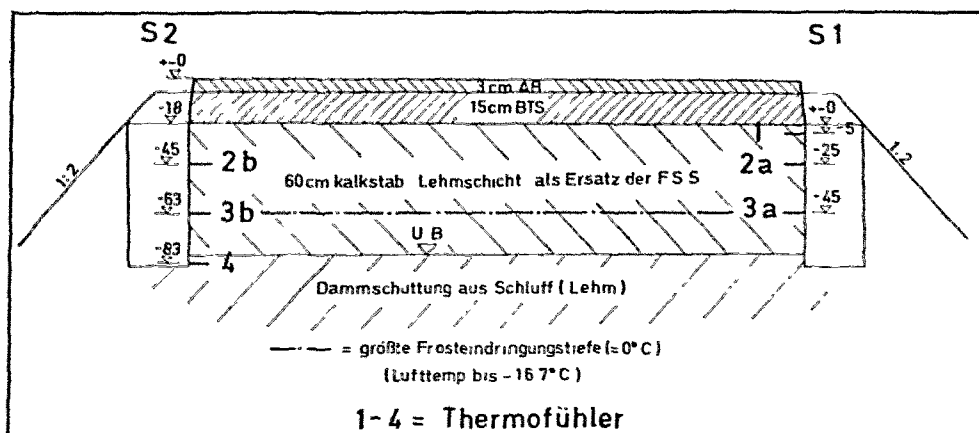


Abb. 33: Fahrbahnaufbau mit vollständigem Ersatz der ungebundenen Tragschicht durch drei kalkstabilisierte Lehmschichten /61/

Obwohl in den darauffolgenden 4 Winterperioden Langzeit-Frosttemperaturen bis maximal -16°C und Frosteindringtiefen bis 63 cm gemessen worden sind, traten keinerlei Fahrbahnschäden auf. Die Temperaturmessungen mit Thermofühlern in den einzelnen Tiefenlagen bis zu 83 cm Tiefe, zeigten eine deutliche Wärmedämmwirkung, sowohl durch die 18 cm dicke Asphaltkonstruktion als auch durch die darunterliegende Kalkstabilisierungsschicht.

6.3 Frostschutz durch Dämmschichten

Um ein Eindringen des Frostes in tiefere Schichten des Untergrundes zu vermeiden, werden in Skandinavien, wo Frosttiefen bis zu 2,50 m anzutreffen sind, Schichten aus Steinwolle, Borken, Reisig, Stroh und Torf unter der Straßenbefestigung eingebaut. Allerdings werden diese Materialien durch die Verkehrslasten stark zusammengedrückt, und die auftretenden Verformungen gefährden die Fahrbahndecke. Um die Verformungen in Grenzen zu halten, müssen die Dämmschichten entweder entsprechend steif sein, oder sie müssen genügend tief unter einer lastverteilenden Schicht eingebaut werden.

Messungen der Temperaturverteilung oberhalb und unterhalb solcher Schichten weisen aus, daß sie ihre Aufgabe als Wärmedämmschicht bei richtiger Dimensionierung ohne weiteres erfüllen. Der Frost dringt dann auch bei länger anhaltenden Frostperioden nicht durch die Dämmschicht in den Untergrund.

Zu bemerken ist, daß sich der Temperaturverlauf von oben nach unten durch Einschalten einer Dämmschicht stark verändert. Ohne spezielle Wärmedämmschicht nimmt die Temperatur bei Frost nach unten hin annähernd gleichmäßig zu, bis sie in größerer Tiefe sich der dort herrschenden, kaum veränderlichen Erdreichtemperatur angleicht. Ist dagegen eine Dämmschicht eingebaut, so verändert sich die Temperatur über dieser Schicht nur wenig, nimmt in der Dämmschicht jedoch rapide zu, während sie unterhalb wiederum nur geringfügig steigt.

6.3.1 Arten der Dämmstoffe

Erfahrungen mit Dämmstoffen als Frostschutz unter bituminösen Straßenbefestigungen und Betonfahrbahnen liegen für Hartschäume und für bitumen- bzw. zementgebundene Dämmstoffe vor. Zu den Hartschäumen, deren Einsatz erprobt ist, zählen:

- Polystyrol
 - formgeschäumt (Partikelschaum)
 - extrudiert (Extruderschaum)
- Polyurethan
 - Fertigplatten
 - Ortschaum
- Teerpechschaum
 - Fertigplatten.

Dämmstoffe, bei denen Bitumen oder Zement als Bindemittel verwendet wird, sind:

- Blähton
- Blähschiefer
- Schaumlava
- Polystyrolpartikel.

Eine Sonderform zementgebundener Dämmschichten sind Schichten aus Gasbeton, Schaumbeton o.ä.

Da Dämmschichten aus Hartschäumen weder Biege- noch Scherspannungen aufnehmen können, werden diese nicht zur Lastverteilung innerhalb der Tragschichten herangezogen. Ihr Einbau erfolgt daher stets unterhalb der Tragschicht, weswegen sie vereinfachend als "nichttragende" Dämmschichten bezeichnet werden. Dagegen können bitumen- bzw. zementgebundene Dämmschichten an der Lastverteilung als Bestandteil der Tragschicht beteiligt werden. Aus diesem Grunde spricht man in solchen Fällen von "tragenden" Dämmschichten.

6.3.2 Anforderungen an Dämmstoffe

Werden Dämmstoffe im Erdreich verwendet, so unterliegen sie einer stärkeren und auch andersgearteten Beanspruchung als dies üblicherweise im Hochbau der Fall ist. Besonders zu erwähnen sind die nachfolgenden Kriterien:

- Die Dämmstoffe müssen ausreichend frostbeständig sein, weil im Winter in der Dämmschicht auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auftreten können.
- Häufige Frost-Tau-Wechsel dürfen die Dämmstoffe nicht zerstören.
- Die Feuchtaufnahme von Wasser in flüssiger oder gasförmiger Form muß möglichst ausgeschlossen werden, denn die Wärmeleitfähigkeit einer Dämmschicht nimmt mit steigendem Wassergehalt zu.
- Die Dämmschicht muß den auftretenden Belastungen - vorwiegend Druckbeanspruchungen - gewachsen sein.

Nach /38/ gelten für die Zulassung und Abnahme von Dämmschichten im Straßenbau die folgenden Richtwerte:

Hartschäume

Rohdichte	$\rho_R \geq 40 \text{ kg/m}^3$
Druckfestigkeit	$\beta_D \geq 4,5 \text{ kp/cm}^2$
oder	
Stauchung bei 3,5 kp/cm ² Druckspannung	$\leq 10 \%$
bleibende Stauchung	$\leq 5 \%$

Schaumpolystyrolbeton

Rohdichte	$\rho_R \geq 500 \text{ bis } 700 \text{ kg/m}^3$
Druckfestigkeit	$\beta_D \geq 15 \text{ kp/cm}^2$

Gasbeton

Rohdichte	$\rho_R \geq 800 \text{ kg/m}^3$
Druckfestigkeit	$\beta_D \geq 50 \text{ kp/cm}^2$

Zementgebundene min. Blähstoffe

Rohdichte	$\rho_R \approx$	900 bis 1200 kg/m ³
Druckfestigkeit	$\beta_D \approx$	50 kp/cm ²

Bitumengebundene min. Blähstoffe

Raumdicke	$\rho_A \approx$	1200 kg/m ³ an Probekörper nach Marshall
Marshall-Stabilität	\approx	300 kp
Fließwert		10 bis 40 1/10 mm.

Grenzwerte für die Wärmeleitfähigkeit, die Feuchtigkeitsaufnahme, die Wasserdampfdiffusion und die Biegezugfestigkeit waren noch nicht festgelegt.

6.3.3 Bauarten

Wie bereits erläutert, wird je nach Aufbau und Zusammensetzung zwischen nichttragenden und tragenden Dämmschichten unterschieden. Hinsichtlich der Verarbeitung und Bauausführung werden in /38/ eine Reihe von Forderungen aufgestellt, von denen die auch für frostgeschützte Flachgründungen relevanten an dieser Stelle zitiert werden sollen:

"Es ist sowohl ein Verlegen von Hartschaumplatten als auch Ortverschäumung möglich. Hartschaumplatten sollen im Verband verlegt werden und satt auf der Unterlage aufliegen. Beim Einbau von ortverschäumtem Hartschaum ist das Planum zu versiegeln, z.B. mit bituminösem Bindemittel. Gleiches gilt für die Oberfläche der seitlich über die darüberliegende bituminöse Befestigung herausragenden Wärmedämmschicht. Die eingebaute Wärmedämmschicht darf nicht direkt vom Baustellenverkehr befahren werden. Auch das Begehen ist auf ein Mindestmaß zu beschränken, um Beschädigungen auszuschließen.

Die Mischgutzusammensetzung bitumengebundener Dämmschichten muß durch Eignungsprüfung ermittelt werden. Bisher sind folgende Zusammensetzungen erprobt worden:

Blähton	Körnung I	0 - 3 mm	30%
	Körnung II	3 - 7 mm	30%
	Körnung III	7 - 15 mm	40%
	12 Gewichtsteile Bitumen B 80		
Blähschiefer	Körnung I	0 - 3 mm	30%
	Körnung II	3 - 7 mm	25%
	Körnung III	7 - 15 mm	25%
	Körnung IV	15 - 25 mm	20%
	12 Gewichtsteile Bitumen B 80		
Schaumlava	Mischkörnung	0 - 15 mm	
	12 Gewichtsteile Bitumen B 80.		

Zementgebundene Dämmschichten wie Leichtbetone aus Blähton, Blähschiefer und ähnlichen Materialien werden nach den üblichen betontechnologischen Grundsätzen zusammengesetzt und eingebaut.

Die Herstellung von Schaumpolystyrolbeton (z.B. Styropor-Beton) erfolgt vom schäumfähigen Rohstoff ausgehend in einer mobilen Aufbereitungsanlage. Dabei wird der Rohstoff auf das etwa 50fache Volumen aufgeschäumt (Schüttdichte 10-15 kg/m³) und anschließend in einer Zwangsmischanlage mit Zement und Zusätzen zum einbaufertigen Schaumpolystyrolbeton aufbereitet. Für kleinere Strecken besteht die Möglichkeit, aufgeschäumte, mit Haftvermittler und Zement vorummantelte Schaumstoffpartikel (z.B. Styropor-Mix) an die Baustelle zu liefern und wie mineralische Leichtzuschläge zu Beton aufzubereiten. Die Anordnung von Scheinfugen in etwa 5 bis 10 m Abstand ist zu empfehlen."

Allgemein wird gefordert, daß "Frostschutzmaterial" oberhalb der Dämmschicht zu verdichten ist. Da hierbei besonders bei Hartschaum-Dämmstoffen mit relativ niedrigem Elastizitätsmodul der nach den ZTVE-StB 65 für das Frostschutzmaterial geforderte Verformungsmodul $E_2 \cong 1000$ bzw. 1200 kp/cm^2 nicht immer erreicht wird, ist ggfs. eine Vermörtelung des Frostschutzmaterials vorzunehmen.

Die Wärmedämmschichten sollen beiderseits mindestens 1 m über die größte Breite der darüberliegenden bituminösen Schichten hinaus gezogen werden oder es sind andere geeignete Maßnahmen vorzusehen, z.B. lotrechter Einbau von Dämmplatten oder Dämmschichten am Fahrbahnrand, um das seitliche Eindringen des Frostes unter die Straßenbefestigung zu verhindern.

Falls erforderlich, ist eine einseitige oder allseitige Versiegelung der Dämmschicht vorzunehmen, um die Feuchtigkeitsaufnahme zu verringern bzw. zu vermeiden."

Je nachdem, ob die Straßendecke aus Asphalt oder Beton hergestellt wird, ergeben sich in Abhängigkeit von den Verkehrsklassen (siehe "Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau bituminöser Fahrbahndecken" des Bundesministers für Verkehr) die in den Abbildungen 32 und 33 wiedergegebenen Bauarten.

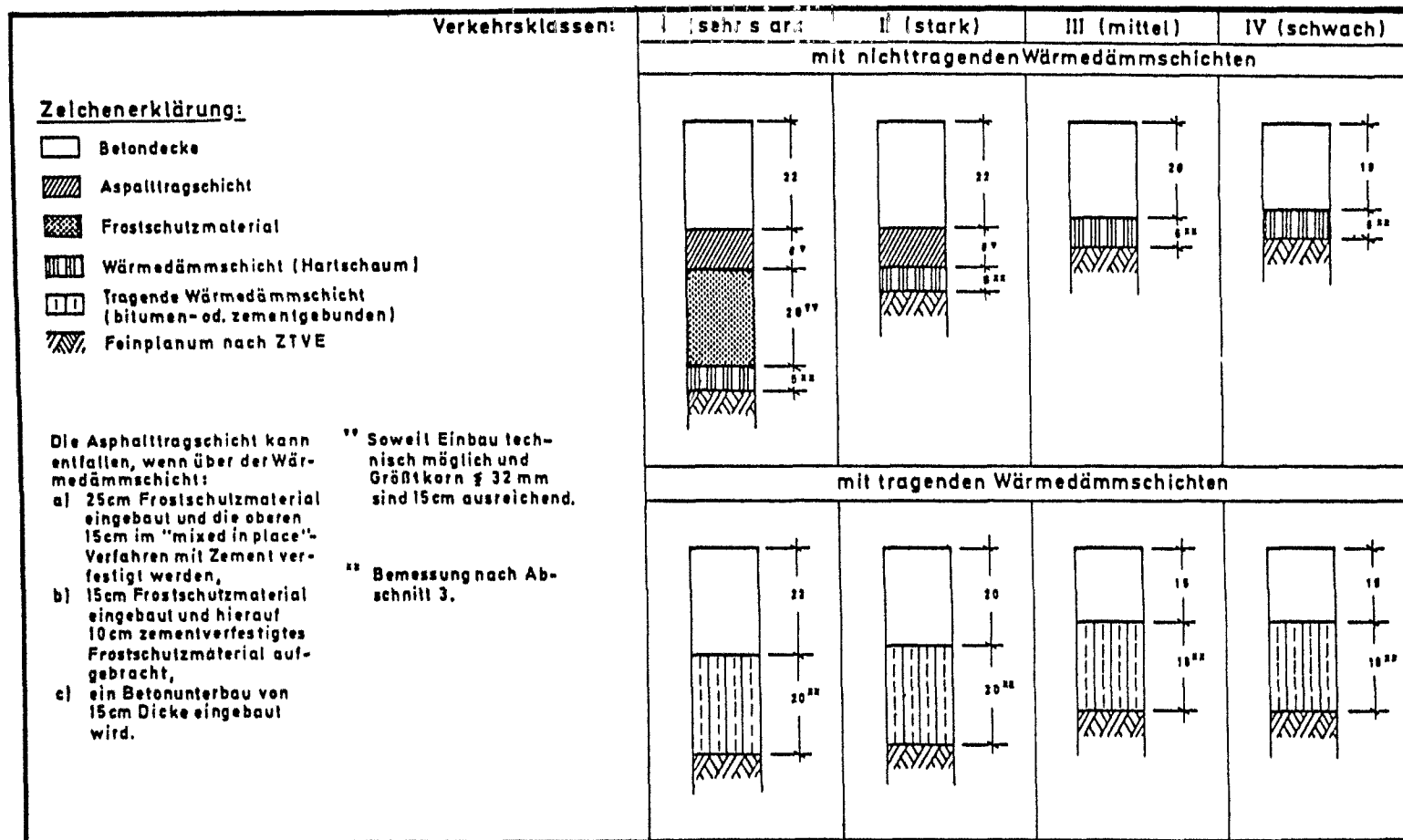








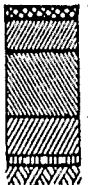
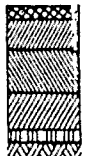
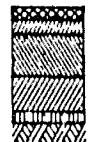

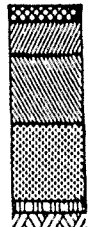
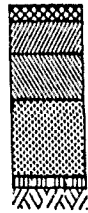






Abb. 34: Empfehlungen für Bauarten von Betonfahrbahnen mit Wärmedämmschichten /38/

		Verkehrsklassen:	I (sehr stark)	II (stark)	III (mittel)	IV (schwach)
mit nichttragenden Wärmedämmschichten						
Zeichenerklärung:  Asphaltdecke  Asphaltbinder  Asphalttragschicht  Untere Asphalttragschicht  Frostschutzmaterial  Wärmedämmschicht (Hartschaum)  Tragende Wärmedämmschicht (bitumen- oder zementgeb.)  Feinplanum nach ZIVE	aus Hartschäumen ohne Kiestragschicht. Voraussetzung: Dämmstoff hitzebeständ. ≥ 200°C	 <div>3,5 cm 8,8 18° 30 (20-22) 10-18° 4°</div>	 <div>3,5 cm 8,8 12° 24 (15) 10-18° 4°</div>	 <div>3,5 cm 3,8 12° 18 (18) 10-18° 4°</div>	 <div>8 cm 18° 18 (12) 10-18° 4°</div>	
	aus Hartschäumen mit Tragschicht aus Frostschutzmaterial	 <div>3,8 8,8 18° (20-22) 20° 3-4°</div>	 <div>3,8 8,8 12° (18) 20° 3-4°</div>	* Dicken bei gebrochenem Kern, bei Rundkern eingeklammerte Werte. † Verdichtung mit leichter Walze ohne Vibrationen. †† Soweit Einbautechnik möglich und Größtkorn ≤ 22 mm sind 18 cm ausreichend.		
mit tragenden Wärmedämmschichten						
	(bitumen- od. zement- gebunden)	 <div>3,8 8,8 24 12 18-20°</div>	 <div>3,8 8,8 20 8 18-20°</div>	 <div>3,8 3,8 18 8 18-20°</div>	 <div>3,8 3,8 12 8 18-20°</div>	

°° Bemessung nach Abschnitt 3

°° Bemessung nach Abschnitt 3

Abb. 35: Empfehlung für Bauarten von bituminösen Befestigungen mit Wärmedämmschichten /38/

Die angegebenen Schichtdicken für die Dämmschichten sind keine feststehenden Werte; sie sind je nach den klimatischen Gegebenheiten mit Hilfe des in /38/ angegebenen Rechenverfahrens zu ermitteln.

7 Der Einfluß der thermischen Verhältnisse im Baugrund auf die Gründungskonzeption

7.1 Ansatzpunkte für die Berücksichtigung der thermischen Baugrundverhältnisse

Die Untersuchungen von Vuorelainen /39/ /40/ in Finnland und Adamson, Dcmner und Rönning /57/ in Schweden, in deren Verlauf durch Berechnung und mehrjährige Messungen an Versuchsbauten die Temperaturverteilung im Erdreich nicht unterkellerten Gebäude ermittelt worden ist, zeigen deutlich, daß eine ernsthafte Gefährdung der Gründung solcher Gebäude infolge Frosteinwirkung kaum zu erwarten ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß das Erdreich vor allem unter der Sohlplatte als Wärmespeicher fungiert, indem es die über die Bodenplatte abfließende Wärme aufnimmt und sie zum Teil je nach Innenklima wieder an das Gebäudeinnere abgibt. Bei geringer werdender Grundwassertiefe verliert dieser Speichereffekt mehr und mehr an Bedeutung, weil dann zunehmend Wärme an das Grundwasser, dessen mittlere Temperatur in der Regel 10°C beträgt, abgegeben wird.

Bemerkenswert sind auch die stark ansteigenden Wärmeverluste in den Randzonen der Sohlplatte. Sie machen deutlich, daß hier unbedingt eine Wärmedämmung erfolgen muß, während im Mittelbereich der Sohle - selbst unter den ungünstigeren skandinavischen Klimabedingungen - schon bei Gebäuden mit ca. 100 m² Grundfläche, die keine Fußbodenheizung besitzen, auf eine Wärmedämmung verzichtet werden kann.

Wenn allerdings die Wärmedämmwirkung des Bodens selbst so ungünstig ist, daß die Wärmeverluste an den Untergrund unvertretbar groß werden, muß die Sohle wärmegeklämt werden, z.B. bei hohem Grundwasserhorizont.

Claesson und Eftring stellen in /42/ ein Rechenmodell vor, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Verteilung der Wärmedämmung im Erdreich zu optimieren, wobei die wärmedämmende Wirkung des Bodens mit in die Betrachtung einfließt. Auch für den im Rahmen dieser Arbeit relevanten Fall der rechteckigen Sohlplatte wird eine leicht nachvollziehbare Lösung angeboten.

Für die Wärmedämmung der Gründung gibt es im Prinzip drei Möglichkeiten, und zwar durch

- a) eine Wärmedämmschicht unterhalb bzw. oberhalb der Sohlplatte je nach Art des verwendeten Dämmstoffes und Größe der Sohl Druckverteilung
- b) Wärmedämmung der Randbalken auf der Außen- bzw. Innenseite oder aber als Kerndämmung
- c) eine Wärmedämmschicht auf der Erdoberfläche rings um das Gebäude herum (Abb. 36).

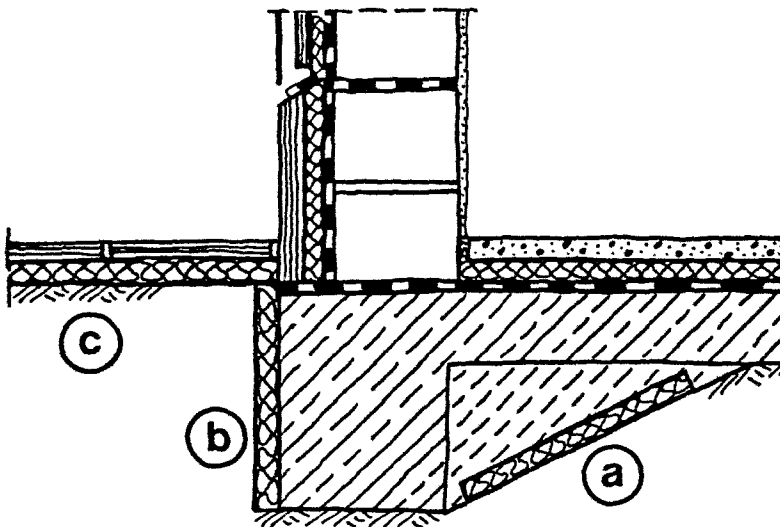


Abb. 36: Möglichkeiten zur Wärmedämmung der Gründung

Dabei werden an den Wärmedämmstoff je nach Einsatzart und -ort unterschiedliche Anforderungen gestellt. Beispielsweise dürfen Dämmstoffe, die mit Erdreich in Berührung kommen, nicht durch Aufnahme von Wasser in ihrer Wirkung beeinträchtigt werden. Auch die Druckfestigkeit des Dämmstoffes ist von Bedeutung, denn die Dämmschichten müssen

den auftretenden Belastungen - vorwiegend Druckspannungen - standhalten. Im Falle c) ist zusätzlich auf eine ausreichende Frostbeständigkeit des Dämmmaterials zu achten. Die Erfahrungen mit dem Einsatz von Wärmedämmstoffen im Straßenbau und die in /38/ genannten Richtwerte können hier wichtige Orientierungshilfen geben. Ausgegangen werden sollte dabei von dem in /38/ definierten "vollständigen" Frostschutz, wonach durch eine ausreichende Bemessung der Frostschuttschicht die Temperatur des frostempfindlichen Untergrundes während einer extrem strengen Frostperiode nicht unter den Gefrierpunkt fallen darf. Der aus wirtschaftlichen Aspekten vorgeschlagene "hinreichende" Frostschutz, der vorliegt, wenn durch das Eindringen des Frostes in den Untergrund in geringerem Umfange Frosthebungen und Wasseranreicherungen infolge Eislinnenbildung innerhalb der Frostperiode verursacht werden, würde aus Gründen der Standsicherheit eine rechnerische Berücksichtigung der Frosthebungen notwendig machen.

Hinsichtlich des Zusammenwirkens der Gründungen von Wohnungsbauten mit gefrorenem Baugrund kann auf zahlreiche experimentelle Untersuchungen in der UdSSR aufgebaut werden /45/ /46/ /47/ /48/ /49/. Dabei handelt es sich sowohl um Labor- als auch um Felduntersuchungen zur Bestimmung der Größe der Frosthebungen bzw. der in der Fuge-Fundament-gefrorener Baugrund ausgelösten Spannungen, die als Normal- und als Schubspannungen auftreten können und mit dem Begriff "Frosthebungsspannungen" beschrieben werden. Einen Überblick über die Möglichkeiten der analytischen wie auch der experimentellen Ermittlung der Frosthebungsspannungen gibt Schroeder in /44/.

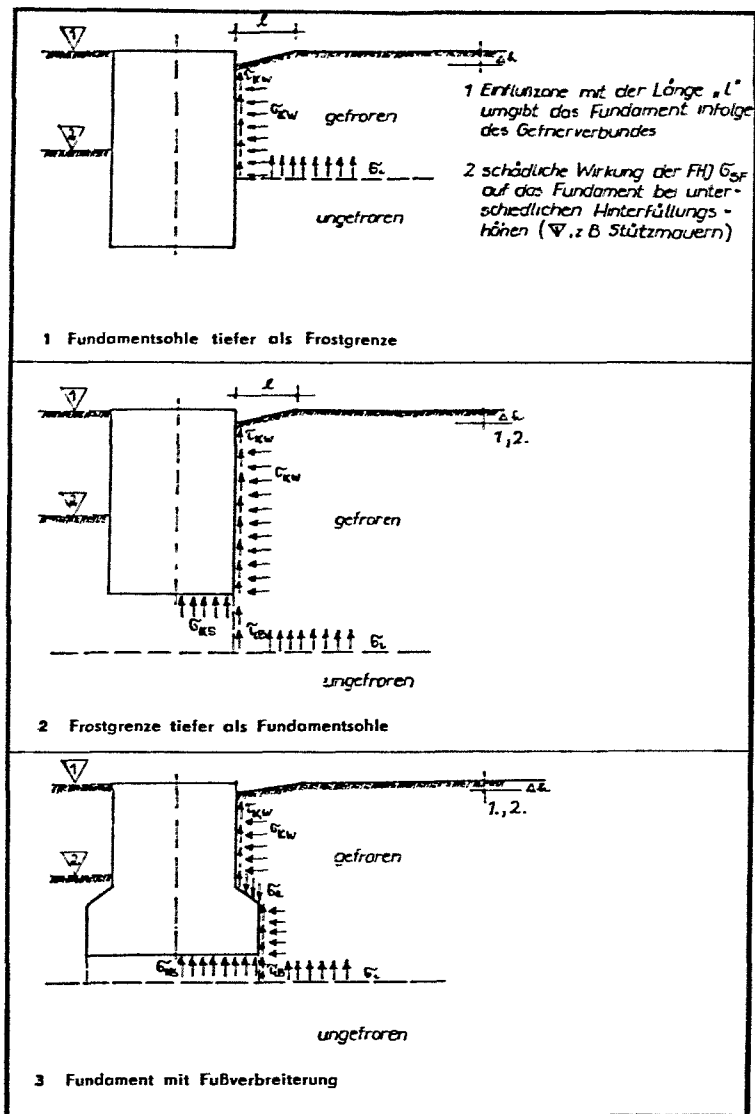


Abb. 37: Übersicht über die an der Fundamentoberfläche auftretenden Frosthebungsspannungen

Die experimentelle Bestimmung der Frosthebungsspannungen sowohl unter Labor- als auch unter Feldbedingungen erfolgt nach den unterschiedlichsten Verfahren, so daß die einzelnen Ergebnisse quantitativ nur schwer miteinander verglichen werden können. Gemeinsam aber ist vielen Arbeiten die qualitative Erkenntnis, daß durch den Sohldruck, der sich in der Fuge zwischen Gründung und Baugrund ausbildet, die Frosthebungsspannungen merklich abgebaut werden bzw. ihr Wirksamwerden vollständig unterdrückt wird. So stellte sich heraus,

daß die Intensität der Frosthebungen neben den klimatischen von einer Reihe bodenmechanischer Einflußfaktoren abhängt, wie z.B.

- Art und Eigenschaften des Baugrundes, insbesondere der Anfangswassergehalt
- der Wert der auftretenden Bodenpressungen, der durch die Aufstandsfläche des Fundamentes und die Größe der einzuleitenden Lasten bestimmt wird
- die Größe der zusammengrückbaren Zone des Baugrundes.

Doch ist eine allgemeinverbindliche Zuordnung der einzelnen Parameter nach dem derzeitigen Erkenntnisstand qualitativ und noch mehr quantitativ mit großen Schwierigkeiten verbunden.

7.2 Die Möglichkeiten der Flachgründung bei Unterschreitung der frostfreien Gründungstiefen gemäß DIN 1054

Das traditionelle Streifenfundament ist auch bei nichtunterkellerten Wohngebäuden der in der Bundesrepublik Deutschland am weitesten verbreitete Gründungstyp. Die Plattengründung, die wegen des besseren Maschinen- und Geräteeinsatzes zweifellos rationeller herzustellen ist, wird nur selten ausgeführt. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, daß nach den derzeitigen Regelungen die Gründungsplatte an ihren Rändern mit einer sogen. "Frostschürze" zu versehen ist und sich damit die Konstruktion in ihrer Querschnittsbildung kaum noch von einer Gründung mit Streifenfundamenten unterscheidet.

Dabei eignet sich die Gründungsplatte in hervorragender Weise als Element zur Ableitung der Bauwerkslasten in den Untergrund. Rechenverfahren, welche die elastische Bettung auf dem anstehenden Boden berücksichtigen, ermöglichen eine wirtschaftliche Bemessung. Die Platte wird dann im Regelfall an ihrer Ober- und Unterseite leicht bewehrt und unter den Innenwänden ohne Verdickung durchgeführt. Besonders bei weniger trag-

fähigen Böden ist diese Art der Gründung zu empfehlen, weil die Bauwerkslasten sehr viel besser über die gesamte Grundfläche verteilt werden als bei Streifenfundamenten, so daß örtliche Spannungsspitzen in der Sohlfuge vermieden und die Setzungsunterschiede reduziert werden.

Nach den bereits zitierten skandinavischen Ergebnissen kann eine Gefährdung durch Frosthebungen bei nichtunterkellerten beheizten Gebäuden ausgeschlossen werden, auch wenn die Sohle wärmegeklämt ist. Sogar während extremer Frostperioden ist nicht zu erwarten, daß der Boden in der unmittelbaren Nähe der Außenwandfundamente gefriert, weil die Heizwärme im Erdreich unter dem Gebäude ebenso wie in seiner Umgebung gespeichert wird. Daher wird in Sektion 23-422 c) der Schwedischen Bauvorschriften SBN 1975 /8/ für Sohlplatten unter beheizten Räumen mit wärmegeklämter, an Erdreich grenzender Fußbodenkonstruktion bestimmt:

"Die nachfolgenden Regeln beziehen sich in erster Linie auf Fußbodenkonstruktionen, die so ausgeführt sind, daß keine Wärmezufuhr über Heizungsrohre o.ä. in die Fußbodenkonstruktion stattfindet. Wenn sie ganz unter Räumen mit einer niedrigsten Monatsmitteltemperatur von ca. +18°C während kalter Winter liegen und mit einer horizontalen Wärmedämmung versehen sind, darf der gesamte Wärmewiderstand in der äußeren Randzone höchstens 3,0 m²K/W betragen.

Als Gründungstiefe werden 0,35 m unter den folgenden Voraussetzungen angenommen:

1. Die Breite des Gebäudes beträgt mindestens 4 m.
2. Die Randbalken oder Grundmauern von in den Temperaturzonen I und II gelegenen Gebäuden sind mit einer Wärmedämmung über der Bodenoberfläche zu versehen, deren Mindestwärmewiderstand 1,0 m²K/W beträgt. Wenn die Fußbodenoberfläche mehr als 0,3 m über der Geländeoberkante liegt, ist der Wärmewiderstand von Randbalken oder Grundmauern nicht ausreichend, sobald er nicht mindestens 2,0 m²K/W in den Temperaturzonen I und II

sowie mindestens $1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ in den Zonen III und IV beträgt. Die Fußbodenoberfläche darf aber auch nicht mehr als $0,6 \text{ m}$ über der Geländeoberkante liegen.

3. Besondere Maßnahmen zur Verringerung des Risikos von Frostschäden sind zu ergreifen innerhalb einer 1 m breiten Randzone bei Vorsprüngen. Solche Maßnahmen können darin bestehen, die Sohlplatte mit einer passenden Wärmedämmung zum Boden hin zu versehen.

Wenn Räume im Winter eine niedrigste Monatsmitteltemperatur von ca. $+ 10^\circ\text{C}$ aufweisen, ist die Gründungstiefe von $0,35 \text{ m}$ auf $0,50 \text{ m}$ zu erhöhen."

Darüber hinaus hat Adamson /41/ in Modellrechnungen für vier Orte in Schweden überprüft, ob und inwieweit die frostfreie Gründungstiefe beeinflusst wird, wenn der in /8/ festgelegte Wert von $3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ überschritten wird. Es zeigte sich, daß der Wärmewiderstand auf $3,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ vergrößert werden kann, ohne daß bei einer Gründungstiefe von 35 cm mit Frosthebungen zu rechnen ist. Dieser Grenzwert entspricht einem k -Wert von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die Sohlplatte, wenn man die Dämmwirkung des Erdreichs unterhalb - hier Ton - mit in die Berechnung eingehen läßt.

Danach ist selbst bei extrem stark wärmegeprägten Gründungen trotz einer frostfreien Tiefe von nur 35 cm bei beheizten Gebäuden im schwedischen Klima nicht mit Frosthebungen in der Sohlfuge zu rechnen. Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten erscheint es daher möglich, die frostfreie Gründungstiefe in unseren Breiten ebenfalls auf 35 cm zu reduzieren, ohne daß Frosterscheinungen unterhalb der Gründung zu befürchten sind. Dabei sollte allerdings auf jeden Fall sichergestellt sein, daß in unmittelbarer Nähe der Fundamente keine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit durch irgendwelche Veränderungen der Bodenoberfläche bzw. durch Aufgraben eintritt.

Eine Reduzierung der frostfreien Gründungstiefe auf 35 cm bedeutet u.a., daß in der Mehrzahl der Fälle nach dem Abtrag des Mutterbodens bereits der Gründungshorizont erreicht ist und sich damit besonders Stahlbetonplatten mit den erwähnten Vorteilen hinsichtlich der Lastabtragung als Gründungsart anbieten. Auf der anderen Seite können auch Streifenfundamente wie bisher ausgeführt werden, allerdings mit dem Unterschied, daß sich ihre Abmessungen und damit auch die Gründungstiefe aus den Stahlbetonbestimmungen (DIN 1045 und zugehörige Bemessungshilfen) ableiten. Allen Konstruktionen ist gemeinsam, daß sie in der Randzone wegen des dort deutlich höheren Wärmeflusses im Vergleich zum Mittelbereich der Sohle zusätzlich wärmegeklämt werden müssen.

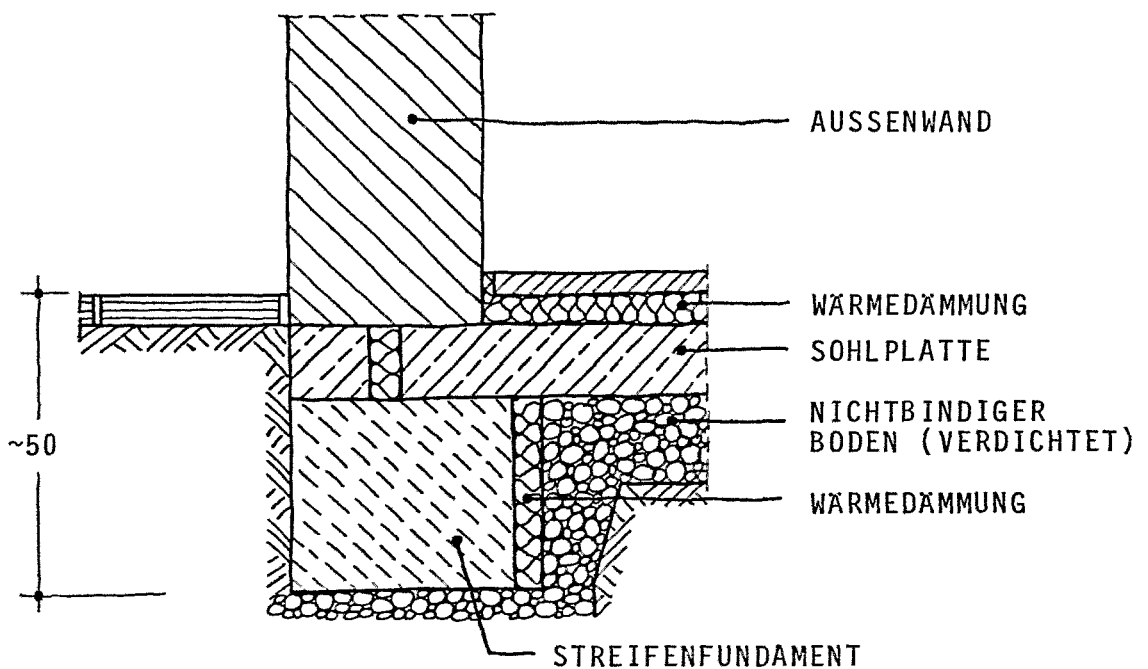


Abb. 38: Streifenfundament mit aufliegender Sohlplatte und Zusatzdämmung auf der Innenseite

Wärmeverluste im Randbereich der Sohle.

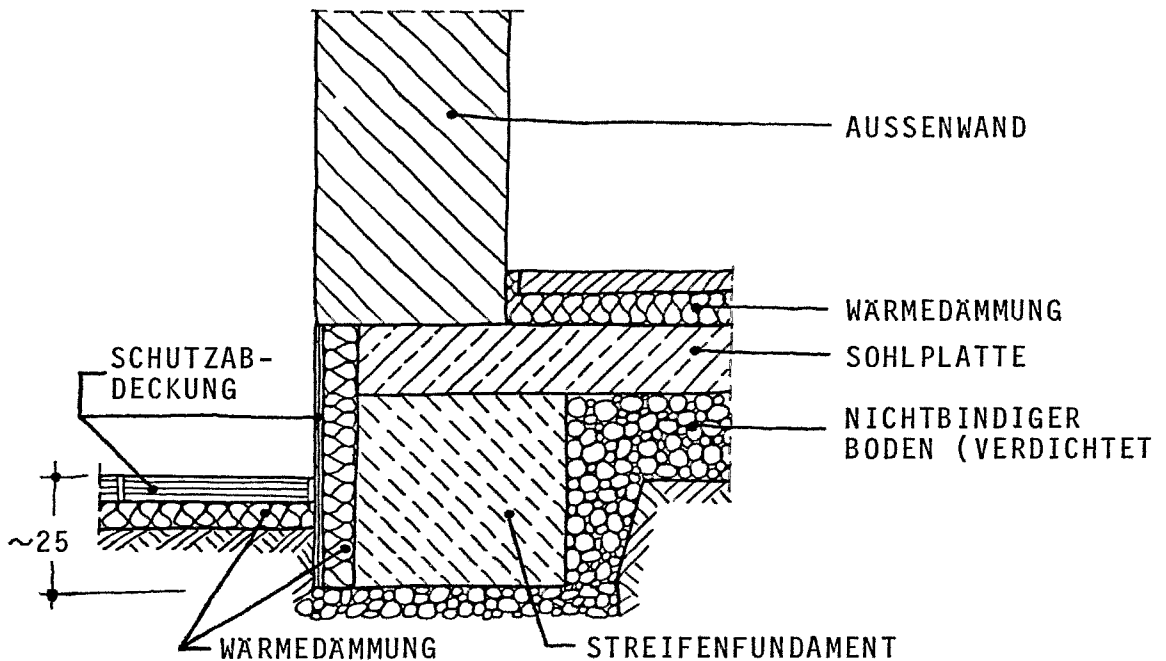


Abb. 40: Streifenfundament mit Zusatzdämmung auf der Außenseite und über der Sohlplatte liegender Wärmedämmschicht

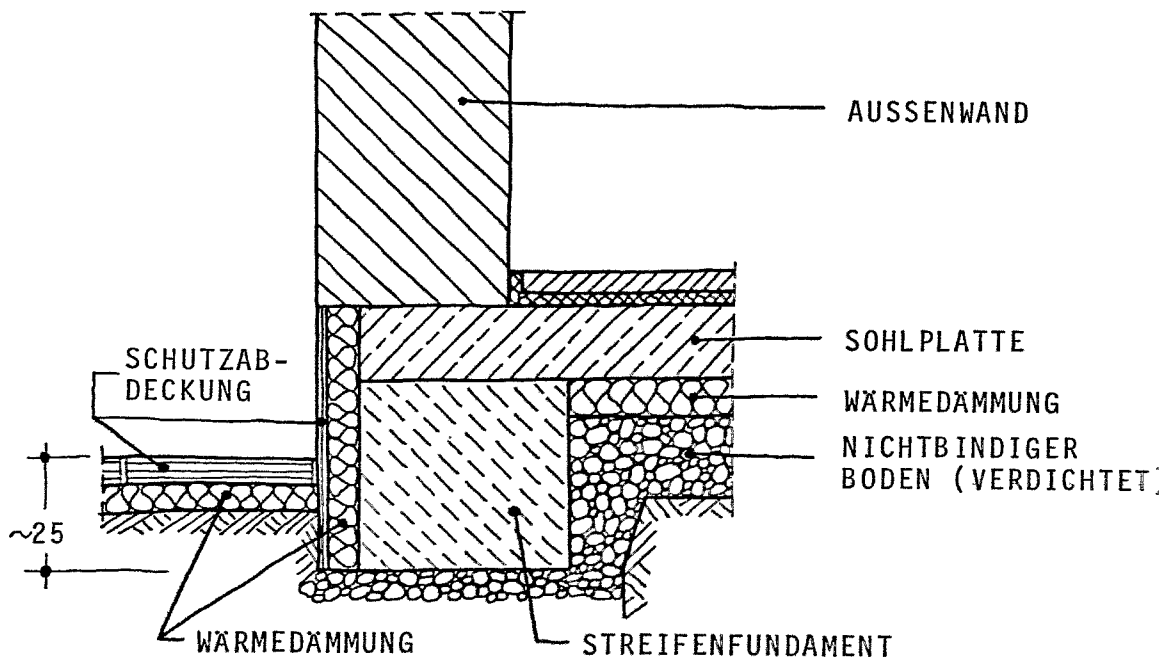


Abb. 41: Streifenfundament mit Zusatzdämmung auf der Außenseite und unter der Sohlplatte liegender Wärmedämmschicht

Zu beachten ist, daß die senkrechte Wärmedämmschicht auf der Außenseite des Fundamentes, soweit sie über das fertige Bodenniveau hinausragt, durch eine Bekleidung geschützt wird, z.B. durch Faserzementplatten. Gleiches gilt für die waagerechte Dämmschicht auf der Geländeoberfläche, wobei hier Betonwerksteinplatten o.ä. als Schutz verlegt werden können.

Erfolgt die Gründung als Stahlbetonsohlplatte, die in ihrer Peripherie durch einen Randbalken verstärkt wird, ergeben sich die in Abb. 42 und 43 dargestellten Konstruktionsprinzipien. Sie können hinsichtlich der Lage und der Ausführung der Wärmedämmschichten noch variiert werden.

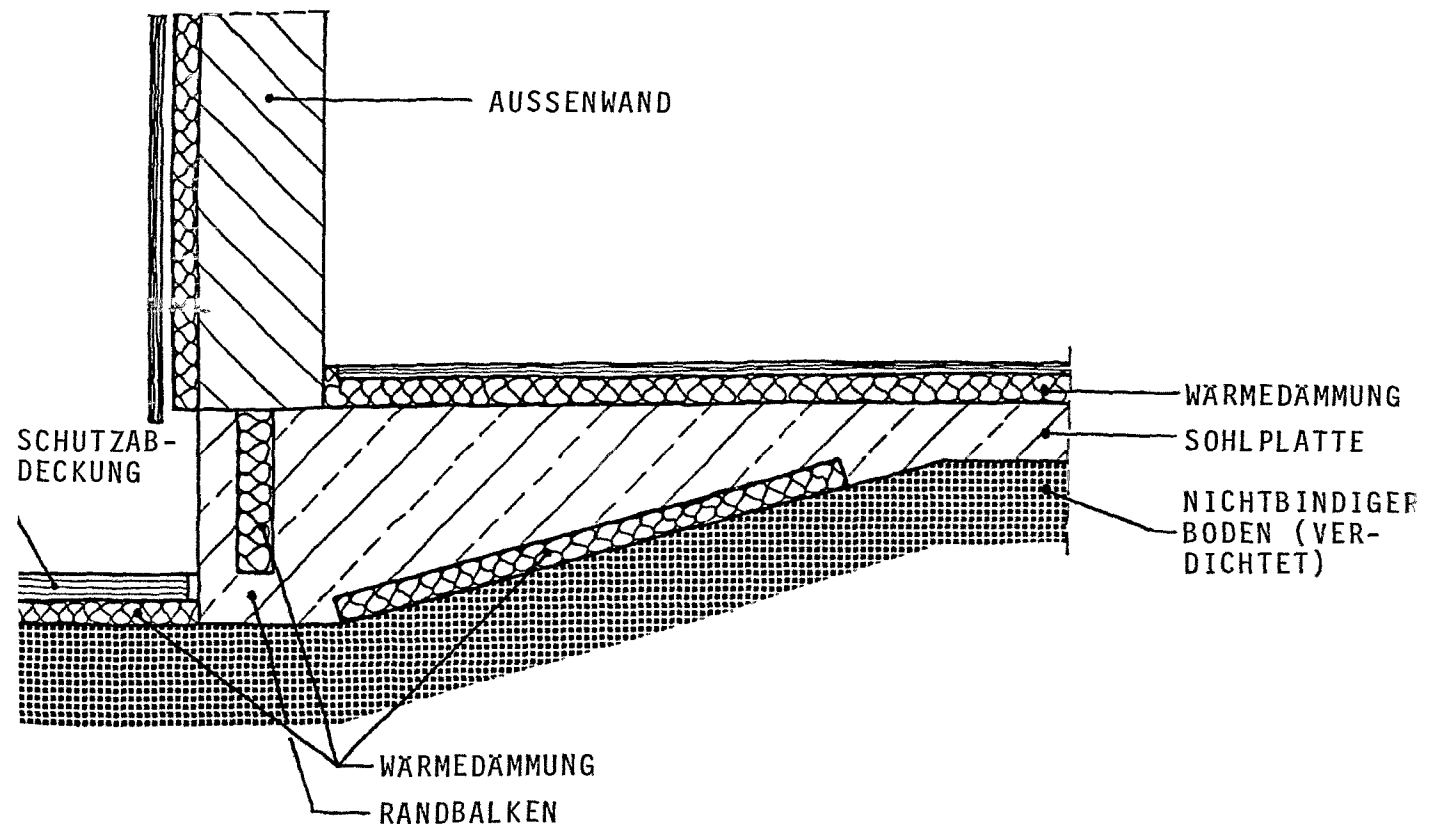


Abb. 42: Stahlbetonsohlplatte mit Wärmedämmung auf der Innen- und Außenseite sowie einer Kerndämmung

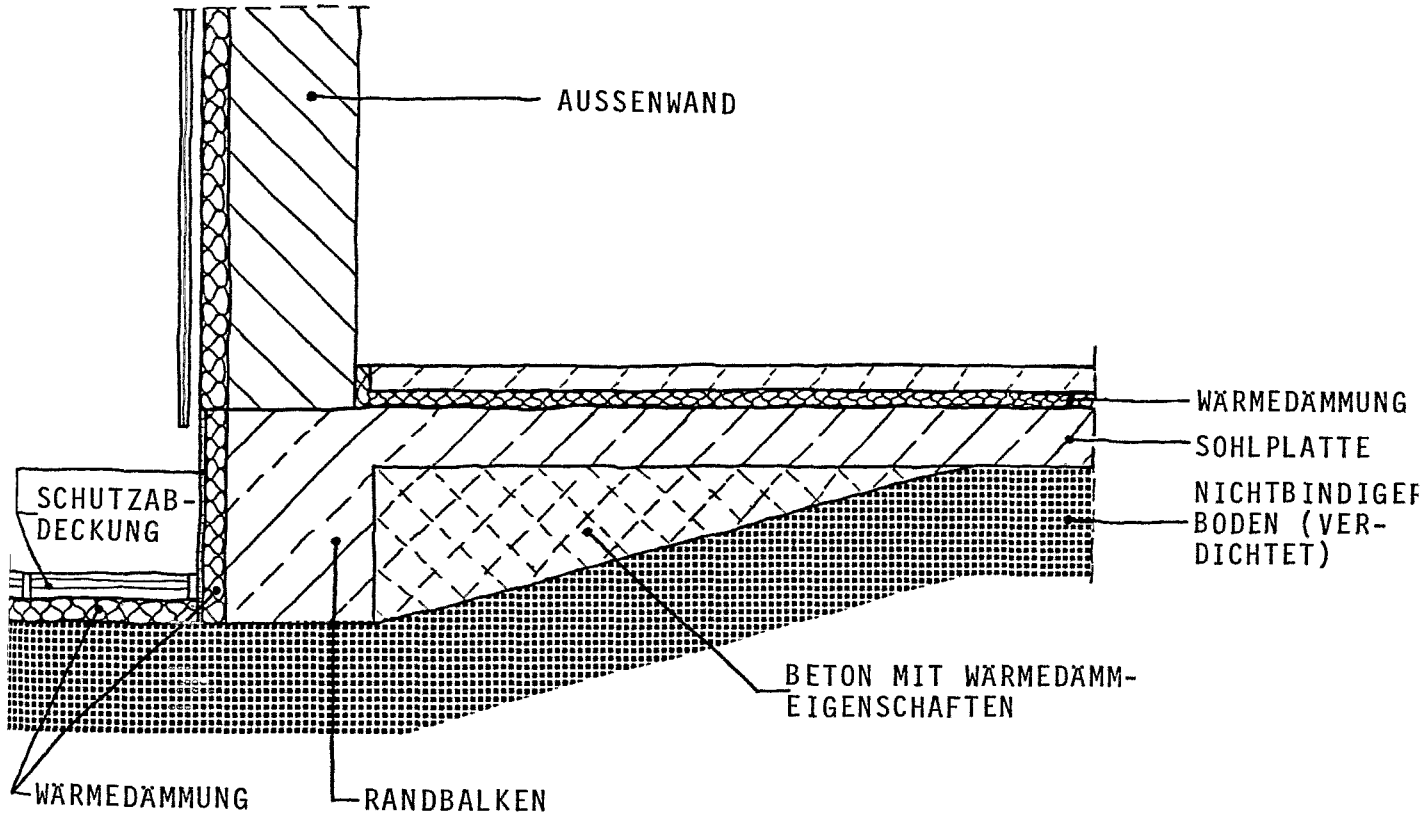


Bild 43: Stahlbetonsohlplatte mit Wärmedämmung auf der Innen- und Außenseite

Die frostfreie Gründungstiefe verringert sich im Vergleich zur Gründung mit Streifenfundamenten, wie sie in den Abb. 40 und 41 dargestellt sind, aufgrund der geringeren Konstruktionshöhen weiter. Der Mindestwert könnte bei ca. 10 cm liegen. Der Übergang vom Randbalken zur Sohlplatte sollte geneigt sein. Die Neigung richtet sich nach dem Böschungswinkel des unter der Sohlplatte aufgefüllten Materials. Die in der Schräge liegende Wärmedämmung könnte auch durch einen Beton mit besonderen Wärmedämmeigenschaften ersetzt werden. Die senkrechte Wärmedämmung der Sohlplatte erfolgt entweder außen oder aber als Kerndämmung, wobei bei der letztgenannten Lösung besonderes Augenmerk auf die Problematik der Abdichtung zu legen ist.

Sobald Dämmstoffe nicht auf der Innenseite an Erdreich grenzender Bauteile angeordnet sind, weicht ihre Beanspruchung wesentlich von der üblicherweise verwendeter Dämmstoffe ab. Es muß damit gerechnet werden, daß

- in Abhängigkeit von den Wasserverhältnissen im Boden der Dämmstoff mehr oder weniger stark durch Wasser beansprucht und je nach Wasseraufnahme die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes verringert wird,
- der Dämmstoff einer erhöhten statischen Belastung standhalten muß - bei senkrechten Flächen durch die Dicke des angefüllten Erdreichs, bei waagerechten Flächen durch das Eigengewicht der Sohlplatte bzw. die Verkehrslasten, gegebenenfalls auch die über die Gründung in den Baugrund abgeleiteten Lasten aus der Gebäudekonstruktion,
- der Dämmstoff durch Frost-Tau-Wechsel zerstört wird und seine Festigkeit verloren geht.
- die Wurzeln von Pflanzen und tierische Schädlinge auf die Dämmstoffe einwirken und diese gegebenenfalls zerstören.

Bevor also Dämmstoffe im Erdreich eingesetzt werden, muß ihr Verhalten gegenüber den genannten Beanspruchungen hinreichend bekannt sein, da eine Nachbesserung oder der Ersatz von schadhaften oder funktionsunfähigen Bauteilschichten sehr aufwendig bzw. sogar unmöglich ist.

Um mit Sicherheit Frosthebungen auszuschließen, sollte die Gründung stets auf eine mindestens 30 cm dicke Schicht eines frostunempfindlichen Bodens gebettet werden, z.B. Kies oder Sand. Das hat zudem den Vorteil, daß diese Schicht bei stauendem Sickerwasser gleichzeitig als Drainage wirkt und Beanspruchungen der Sohlplatte durch im Boden vorhandenes Wasser nicht zu erwarten sind. Wenn in Zukunft eingehendere Erfahrungen über mit Kalk bzw. Zement stabilisierte Böden vorliegen, sind auch Lösungen ohne Filterschicht denkbar, wobei Abdichtungsmaßnahmen gegen im Boden enthaltenes Wasser in den Blickpunkt rücken.

Ein gänzlich anderer Weg, der bei der Planung von Gebäuden beschritten werden könnte, wäre der, daß Frosthebungen in Kauf genommen werden und die daraus resultierenden Frosthebungsspannungen als Belastung auf das Gebäude bzw. das Fundament angesetzt werden. Den international fortschrittlichsten Stand auf diesem Gebiet stellen die in der Sowjetunion gemachten Erfahrungen und die daraus abgeleiteten Empfehlungen dar. In bezug auf die Planung und die Berechnung der Bauwerksgründung sind die nachstehenden Quellen von Bedeutung:

- "Empfehlungen zur Projektierung von Gründungen und Fundamenten auf frosthebenden Böden" /63/
- SNIP II-18-76 , Teil II, Kapitel 18 "Gründungen und Fundamente auf dauernd gefrorenen Böden" /64/
- "Richtlinien für das Bauen auf dauernd gefrorenen Böden" /65/.

In diesen Unterlagen sind Angaben über die auf das Bauwerk einwirkenden Frosthebungsspannungen in Abhängigkeit bestimmter Parameter für verschiedene Böden enthalten. So werden für die Annahme der tangentialen Frosthebungsspannungen in /63/ die in Abb. 44 angegebenen Werte empfohlen. Für die normal zur Fundamentsohle wirkenden Frosthebungsspannungen macht /64/ die in Abb. 45 aufgeführten Angaben.

Bodenart	Konsistenz-index I_c [—]	Lage des GW- spiegels unter GOK [m]	Tangent. FHS τ_{KS} [N cm ²]
sandiger Lehm Lehm Ton	$0,5 < I_c$	$z < 0,5$ $< 1,0$ $< 1,5$	10
schluff. Sand sand. Lehm Lehm Ton	$0,25 < I_c < 0,5$	$z < 0,5$ $0,5 \dots 1,0$ $1,0 \dots 1,5$ $1,5 \dots 2,0$	8
Feinsand schluff. Sand sand. Lehm Lehm Ton	$0 < I_c < 0,25$	$z < 0,5$ $0,5 \dots 1,0$ $1,0 \dots 1,5$ $1,5 \dots 2,0$ $2,0 \dots 3,0$	6

Abb. 44: Tangentiale Frosthebungsspannungen τ_{KS}
/63/

Bodenart	Berechnungswert σ_{KS} [N/cm ²] bei einer Bodentemperatur T [°C]											
	-0,3	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-2,5	-3,0	-3,5	-4,0	-6,0	-8,0	-10,0
bei einem Eisgehalt des Bodens $L_v < 0,2$												
1. Kiese, Grob- u. Mittelsande	55	95	125	145	160	180	195	200	220	260	295	330
2. Feinsande, schluff. Sande	45	70	90	110	130	140	160	170	180	220	255	285
3. sandige Lehme	30	50	70	80	105	115	130	140	150	190	225	250
4. Lehme, Ton	25	45	55	65	80	90	100	110	120	155	190	220
bei einem Eisgehalt des Bodens $L_v > 0,2$												
alle Böden 1. - 4.	20	30	40	50	60	70	75	85	95	125	155	175

L_v - Eisgehalt des Bodens infolge Eislinsenablagerungen [%]

$$L_v = \frac{\gamma_s w_E}{\gamma_E + \gamma_s (w_s - 0,1 w_N)}$$

w_E - Wassergehalt des Bodens infolge Eis

w_s - summarischer Wassergehalt des Bodens

w_N - Anteil des nichtgefrorenen Wassers bei der entsprechenden Bodentemperatur

γ_E - spezif. Gewicht des Eises (0,0009 kg/cm³)

γ_s - Reindichte des Bodens [kg/cm³]

Abb. 45: Berechnungswerte für die Frosthebungsspannungen σ_{KS} in Fundamentsohlen von Pfeilergründungen /64/

8 Zusammenfassung

Gerade bei Ein- und Zweifamilienhäusern sind die Kosten für Keller und Gründung in besonders großem Umfange an den Gesamtkosten beteiligt. Dieser Anteil liegt je nach Größe der Grundfläche zwischen 30 und 40%. Aus Gründen der Kostenersparnis erscheint es daher legitim, auf eine Unterkellerung zu verzichten und die normalerweise im Keller notwendigen Räume anderweitig anzuordnen.

In diesem Zusammenhang rücken einfachere und dennoch sichere Möglichkeiten der frostfreien Gründung in den Vordergrund. Hinweise für die Ausführung finden sich vornehmlich im Straßen- und Eisenbahnbau sowie im skandinavischen Wohnungsbau. Hier spielen Frosteinwirkungen schon seit vielen Jahren eine wesentliche Rolle bei der Planung und Ausführung.

In der Bundesrepublik Deutschland ist der Komplex des Zusammenwirkens von gefrorenem Baugrund mit dem Bauwerk im Wohnungsbau dadurch geregelt, daß man durch die Forderung nach frostfreier Gründungstiefe gem. DIN 1054 eine Beeinträchtigung der Baukonstruktion durch Frost vermeidet. Danach muß die Gründungsohle

in der Regel mindestens 0,8 m unter Gelände liegen. Die analoge Vorschrift der DDR - TGL 11466 - geht nur von einer Gründungstiefe der Fundamente von 0,5 m aus, bezogen auf die endgültige Oberkante des Geländes. Ein Vergleich mit den Anforderungen anderer Länder zeigt, daß die Forderungen nach frostfreier Gründung gem. DIN 1054, bezogen auf unsere klimatischen Verhältnisse sehr weit gehen, zumal durch die Beheizung nichtunterkellelter Wohngebäude eine Erwärmung des Untergrundes stattfindet, so daß Frosteinwirkungen im Bereich der Gründung bis auf wenige Ausnahmen ausgeschlossen werden können.

An Erdreich grenzende Bauteile unterliegen infolge der speziellen Temperatur-, Wärmeleitungs- und Feuchtigkeitsverhältnisse im Erdreich besonderen wärmeschutztechnischen Gegebenheiten. Die Temperatur des Erdreichs wird durch das Klima an der Erdoberfläche bestimmt. Sie liegt etwa 1°C über der jeweiligen mittleren Jahrestemperatur des Außenklimas und beträgt demnach in unseren geografischen Breiten ca. +10°C. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs - nach DIN 4108 gilt für nichtbindige Böden

$\lambda_R = 1,4 \text{ W/(mK)}$ und für bindige Böden $\lambda_R = 2,1 \text{ W/(mK)}$ - und seiner Wärmekapazität - sie beträgt ca. 440 Wh/(m³K) - dringen die kurzfristigen täglichen Temperaturschwankungen nur wenig mehr als 50 cm in den Boden ein. Entsprechend dem steten Wechsel der Strahlungsintensität verlaufen diese Temperaturgänge sinusförmig. Mit zunehmender Tiefe wird die Weitergabe der Temperaturschwankungen zeitlich verzögert - man spricht von Phasenverschiebung - und die Schwankungsbreite verringert - dies ist die sog. Temperaturamplitudendämpfung-. Allgemein gilt, daß die kurzzeitigen täglichen Temperaturschwankungen je nach Bodenart in maximal 1 m Tiefe abklingen, wobei die Phasenverschiebung bis zu 12 Stunden betragen kann. Die täglichen Temperaturschwankungen werden überlagert durch die jahreszeitlich bedingten Temperaturgänge,

die z.B. in 4 m Tiefe mit zwei- bis dreimonatiger Verzögerung Temperaturschwankungen der mittleren Erdreichtemperatur um $\pm 4^{\circ}\text{C}$ hervorrufen. In 12 bis 20 m Tiefe sind auch die jahreszeitlichen Schwankungen kaum noch wahrnehmbar, so daß hier eine konstante mittlere Erdreichtemperatur herrscht, die mit der des Grundwassers identisch ist.

Nur wenn die an Erdreich grenzenden Bauteile vom Grundwasser umspült werden und somit die durch das Bauteil strömende Wärmemenge direkt abgeführt wird, ist davon auszugehen, daß unmittelbar auf der Außenseite des erdberührten Bauteils die o.g. Erdreichtemperatur herrscht. In allen anderen Fällen wirkt das Erdreich als Wärmedämmung und Wärmespeicher zugleich, so daß der Wärmeaustausch über das Erdreich an die Außenluft und an den Grundwasserspiegel verringert wird.

Bei flachgegründeten, nichtunterkellerten Gebäuden tritt in einer ca. 1 m breiten Randzone der Bodenplatte wegen der geringen Schichtdicke des schützenden Erdreichs bei niedrigen Außenlufttemperaturen eine größere Wärmestromdichte auf. Dieser Effekt verliert an Bedeutung je kleiner der Umfang der Sohlplatte im Verhältnis zur Fläche ist. Die Dichte des gleichmäßig über die Sohlplatte verteilten zum Grundwasser gerichteten Wärmestroms nimmt mit zunehmender Grundwassertiefe ab und ist daher allgemein bei nichtunterkellerten Wohngebäuden gering. Lediglich bei besonders hohen Grundwasserständen muß den Wärmeverlusten in dieser Richtung Rechnung getragen werden.

Die Temperatur-, Wärmeleitungs- und Feuchtigkeitsverhältnisse im Erdreich unter beheizten Wohngebäuden lassen - unterstützt durch die skandinavischen Meßergebnisse - den Schluß zu, daß die derzeitig geforderte Gründungstiefe von 0,8 m extrem auf der sicheren Seite liegt. Sie könnte mit großer Wahrscheinlichkeit auf 50 cm verringert werden, ohne daß im Winter schädliche Frosthebungen zu befürchten sind. Werden gezielt Wärmedämmmaßnahmen im Erdreich ergriffen, ist eine weitergehende

Reduzierung der frostfreien Gründungstiefe denkbar. Dies würde vor allem bedeuten, daß die bisher bei nichtunterkellerten Gebäuden selten anzutreffende Gründungsart der Stahlbeton-Sohlplatte mit verstärktem Randbalken als leicht und wirtschaftlich herzustellendes Gründungselement häufiger zum Einsatz gelangen könnte und somit die Fundamentierungsarbeiten erleichtert und vereinfacht würden. Zur Verhinderung von Durchfeuchtungsschäden ist unter der Gründung eine mindestens 30 cm dicke verdichtete Schicht aus Kies o.ä. vorzusehen, die als Drainage wirkt und Frosthebungen mit Sicherheit ausschließt. Die verwendeten Wärmedämmstoffe dürfen, sofern sie mit Wasser in Berührung kommen, ihre Dämmeigenschaften nicht verändern. In Betracht kommen deshalb Dämmstoffe, die zum Wasser keine Affinität haben, wie z.B. extrudierte Schaumkunststoffe oder Schaumglas. Außerdem ist wichtig, daß die verwendeten Wärmedämmstoffe beständig gegen die jeweils verwendeten Dichtstoffe sind.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

Normen und Vorschriften

- / 1/ DIN 1054 Baugrund; zulässige Belastung des Baugrunds. November 1976
- / 2/ DIN 1054 Bb1. Baugrund; zulässige Belastung des Baugrunds, Erläuterungen. November 1976
- / 3/ DIN 4018 Baugrund; Berechnung der Sohl-druckverteilung unter Flächengründungen. September 1974
- / 4/ DIN 4019 T 1 Baugrund; Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung. April 1979
- / 5/ DIN 4019 T 1 Bb1. 1 Baugrund; Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung, Erläuterungen und Berechnungsbeispiele. April 1979
- / 6/ DIN 4019 T 2 Baugrund; Setzungsberechnungen bei schräg und bei außermittig wirkender Belastung (Verkantung), Richtlinien. Februar 1981
- / 7/ DIN 4019 E T 2 Baugrund; Setzungsberechnungen bei schräg und bei außermittig wirkender Belastung. April 1979
- / 8/ Swedish Building Regulations SBN 1975 Kapitel 23: 422 Grundläggningdjup för NÅGRA KONSTRUKTIONER. SBN 1975 Supplement 1
- / 9/ ZTVE-STB 76; zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau 1976

Fachliteratur und Forschungsberichte

- /10/ Schlums: Konstruktiver Straßenbau; Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Stuttgart 1970
- /11/ Mittag, M.: Bau- und Konstruktionslehre, 13.Aufl. 1963 C. Bertelsmann Verlag, Gütersloh 1963
- /12/ Frick; Knöll; Baukonstruktionslehre Teil 1 Neumann: 26.Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart 1979
- /13/ Scheffer; Schacht- Lehrbuch der Bodenkunde, 10.Aufl. schabel: Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1979
- /14/ Hartge, K.H.: Einführung in die Bodenphysik, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1978
- /15/ Grundbau-Taschenbuch, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1966
- /16/ Graßhoff; Siedek: Handbuch Erd- u. Grundbau, Werner-Verlag, Düsseldorf 1978

- /17/ Stiegler, W.: Baugrundlehre für Ingenieure,
Werner-Verlag,Düsseldorf 1973
- /18/ Rübener,
Rolf H.;
Stiegler, W.: Einführung in Theorie und Praxis der Grund-
bautechnik Teil 1
Werner-Verlag,Düsseldorf 1978
- /19/ Schulze;
Simmer : Grundbau, Teil 1; 16. Aufl.
B.G.Teubner,Stuttgart 1977
- /20/ Schulze;
Simmer: Grundbau, Teil 2; 15.Aufl.
B.G.Teubner, Stuttgart 1978
- /21/ Fuchs, E.;
Klengel, K.-J.: Baugrund und Bodenmechanik, 6.Aufl.
VEB Verlag für Bauwesen Berlin 1977
- /22/ Széchy, K.: Der Grundbau 2. Band 2. Teil
Springer-Verlag Wien 1965
- /23/ TGL-Handbücher für das Bauwesen,
Erd- und Grundbauausführung, 3.Aufl.
VEB Verlag für das Bauwesen Berlin 1978
- /24/ Cammerer,
J.S.: Wärme- und Kälteschutz in der Industrie,
4. Aufl. Springer Verlag Heidelberg 1962
- /25/ Schild, E.;
Oswald, R.: Wärmeschutz von erdberührten Gebäudeaußen-
flächen; Querschnittsbericht zum Stand der
Erkenntnisse, Schriftenreihe "Bau- und
Wohnforschung" des Bundesministers für Raum-
ordnung, Bauwesen und Städtebau
Heft 04.061 1979
- /26/ Heckmann, H.: Wirtschaftlichkeit von Gründungen bei ver-
schiedenen Wohngebäuden und unterschiedli-
chen Bodenarten, "Das Baugewerbe", Heft
24/72 und 1/73, Verlagsges. R. Müller Köln
- /27/ Gründungen im Wohnungsbau; Berichte aus der
Bauforschung Heft 9, Verlag Wilhelm Ernst
& Sohn, Berlin-Wilmersdorf 1958
- /28/ Flachgegründete Streifenfundamente; Berichte
aus der Bauforschung Heft 30, Verlag
Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-Wilmersdorf 1963
- /29/ Flachgründungen; Berichte aus der Baufor-
schung Heft 32, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn,
Berlin-Wilmersdorf 1963
- /30/ Der Einfluß der Fundamentform auf die Grenz-
tragfähigkeit flachgegründeter Fundamente;
Berichte aus der Bauforschung Heft 65,
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-Wilmers-
dorf 1970
- /31/ Die Grenztragfähigkeit von flach gegründeten
Streifenfundamenten unter geneigter Bela-
stung nach Theorie und Versuch; Berichte aus
der Bauforschung Heft 101, Verlag Wilhelm
Ernst & Sohn, Berlin-Wilmersdorf 1975

- /32/ Zenker, R.;
Dimitroff, S.: Flächenförmige Gründungskörper; Biege-
theorie der Kugelschalen; Deutsche Bauakade-
mie Berlin 1967
- /33/ Panke: Richtwerte für Konstruktionen im Wohnungs-
bau; Mitteilungsblatt der Arbeitsgemein-
schaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel
Heft 2/3 1970
- /34/ Stehno, V.;
Fantl, K.: Rationalisierung der Fundierung bei Hoch-
bauten, Forschungsbericht 53 Österreichi-
sches Institut für Bauforschung Wien 1969
- /35/ Tomlinson;
Driscoll;
Burland: Foundations for low-rise buildings;
Building Research Establishment Garston,
Watford 1978
- /36/ Roth, W.: Experimentelle Untersuchungen zur Verhinde-
rung von Frostaufbrüchen in bindigen Böden;
Mitteilungen des Instituts für Bodenmecha-
nik, Felsmechanik und Grundbau Technische
Hochschule Graz Heft 3
- /37/ Balduzzi, F.: Experimentelle Untersuchungen über den Bo-
denfrost; Prom. Nr. 2870 der Eidgen. Techn.
Hochsch. in Zürich. Dissertationsdruckerei
Leemann AG., Zürich 1959
- /38/ Behr, H. u. A.: Anwendung von Dämmschichten im Straßenbau;
Bericht über die Ergebnisse der Arbeiten des
Ausschusses "Dämmschichten als Frostschutz"
in den Jahren 1966 - 1970
- /39/ Vuorelainen,
O.: The temperatures under houses erected
immediately on the ground and the heat losses
from their foundation slab; The State
Institute for Technical Research, Finland,
Helsinki 1960
- /40/ Vuorelainen,
O.: The temperature field produced in the ground
by a heated slab laid direct on ground, and
the heat flow from slab to ground;
Publication Nr. 52 of the State Institute
for Technical Research, Finland, Helsinki 1960
- /41/ Adamson, B.: Foundation depth for floor slabs laid
directly on the ground which are provided
with an extremely high degree of thermal
insulation; Report BKL 1977:8 from the Dept.
of Building Science, the Lund Institute of
Technology, Lund 1977
- /42/ Claesson, J.;
Eftring, B.: Optimal distribution of thermal insulation
and ground heat losses: Document D 33:1980
Swedish Council for Building Research

- /43/ Jessberger, H.L.; Hartel, F.: Einfluß von Druckspannungen auf die Volumenänderung des Bodens beim Gefrieren; Die Bautechnik 4/1967
- /44/ Schroeder, S.: Probleme des Zusammenwirkens von Fundamenten mit gefrorenem Baugrund; Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar 2/1978
- /45/ Mel'nikov, B., N.: Experimental investigations of the stability of footings in freezing clay soils; Sverdlovsk. Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov No. 2, March-April 1967
- /46/ Shvets, V.B.; Kochengin, B.J.: Stability of foundations under conditions of soil heaving during freezing; Sverdlovsk. Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov Nr. 3, May-Juni 1966
- /47/ Petrov, G.G.: Investigation of tangential forces of frost heave. Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov No. 5, September-October 1973
- /48/ Shalagin, A.P.: Deformation of eluvial coarse detrital soils during freezing; Sverdlovsk. Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov No. 3, May-June 1969
- /49/ Pataleev, A.V.; Alaev, G.S.: Value of swelling forces of foundations in Khabarovsk; Khabarovsk. Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov No. 6, November-December 1965
- /50/ Schaible, L.: Frost- und Tauschäden an Verkehrswegen und deren Bekämpfung Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1957
- /51/ Ruckli, R.: Der Frost im Baugrund Springer-Verlag Wien, 1950
- /52/ Jessberger, H.L.: Bodenfrost - Zusammenstellung und Auswertung neueren Schrifttums über die Wirkung des Frostes auf den Boden Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (1971) Heft 125
- /53/ Kübler, G.: Der Einfluß der Witterungsfaktoren auf die Frostgefährdung von Straßen Wissenschaftliche Berichte der Bundesanstalt für Straßenbau (1964), Heft 3
- /54/ Beskow, B.: Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads The Swedish Geological Society 1947 Series C Nr. 375

- /55/ Cammerer, J.S.: Tabellarium aller wichtigen Größen für den Wärme- und Kälteschutz
Red. Rheinhold & Mahla AG., Mannheim,
11.Auflage 1973
- /56/ Schild, E.,
u.a.: Wärmeschutz von erdberührten Gebäudeaußen-
flächen
Schriftenreihe des Bundesministers für Raum-
ordnung, Bauwesen und Städtebau
Heft 04.061, 1979
- /57/ Adamson, B.;
Domner, G.;
Rönning, M.: Marktemperaturer under hus utan källare
(Soil temperatures under houses without
basement)
Statens råd för byggnadsforskning,
Handlingar Nr. 46, Stockholm 1964
- /58/ Casagrande, A.: Bodenuntersuchungen im Dienste des Straßen-
baues
Der Straßenbau 1934 25. Jahrg. Nr. 3
- /59/ Floß, R.: Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Aus-
wahl und Dimensionierung von Straßenbefesti-
gungen
Straße und Autobahn (1973) S. 17-26
- /60/ Wiehler, H.G.
u.a.: Straßenbau, Band 2, Konstruktion und Techno-
logie
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1979
- /61/ Homann, O.: Kalkstabilisierte Bodenschichten als Ersatz
für Frostschutzschichten
Baumaschine-Baugerät-Baustelle 4/80
- /62/ Takao, U.;
Penner, E.: The Dependence of Frost Heaving on Load
Application
- Preliminary Results -
Takenada Technical Research Report, No.18,
October 1977
- /63/ Empfehlungen zur Projektierung von Gründun-
gen und Fundamenten auf frosthebenden Böden
Stroiizdat (Bauverlag) Moskau 1972
- /64/ SNIP II - 18-76, Teil II, Kap. 18
Gründungen und Fundamente auf dauernd gefro-
renen Böden
Staatsbau UdSSR, Moskau 1977
- /65/ Richtlinien für das Bauen auf dauernd gefro-
renen Böden
Stroiizdat (Bauverlag) Leningrad 1977